

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

**“Umanoidi in produzione: valutazione
dell’introduzione nell’industria manifatturiera
italiana”**



Relatore

Prof.ssa Alessandra Colombelli

Candidato

Giosuè Valbonesi

Co-Relatore

Ing. Orlando Tovar

Novembre 2025

Sommario

1. Introduzione	3
1.1 Contesto e ruolo della robotica avanzata in manifattura	3
1.2 Robotica avanzata, cobot, AMR e umanoidi	4
1.3 Rilevanza e attualità del tema	5
1.4 Metodologia di ricerca e struttura della tesi	7
2. Background e Stato dell'Arte	8
2.1 Evoluzione dei modelli di business nel manifatturiero	8
2.2 Situazione AS-IS della robotica avanzata nel mondo	10
2.3 Tecnologie abilitanti	14
2.4 Benchmark internazionale	23
2.5 Contesto Italiano e Regioni Industriali	24
3. Pain Points del Manifatturiero e Gap di Automazione	29
3.1 Criticità globali del settore	29
3.2 Pain Points specifici per sottosettore	32
3.3 Why Humanoids?	37
3.4 Implicazioni per i robot umanoidi come risposta ai divari tecnologici	42
4. Casi d'Uso e Scenari Disruptive	46
4.1 Evoluzione verso i robot umanoidi	46
4.2 Lights-out factory e Dark factory	55
4.3 Impatto sociale e lavorativo	61
4.4 Focus settoriale su Piemonte, Lombardia ed Emilia-Romagna	64
5. Caso applicativo	69
5.1 Contesto aziendale e processo AS-IS	69
5.2 Scenario TO-BE con introduzione del robot umanoide	71
5.3 Analisi comparativa AS-IS vs TO-BE	74
5.4 Stima del ROI dell'investimento in robot umanoide	77
5.5 Discussione finale e raccomandazioni	82
6. Analisi di Fattibilità e Impatti	84
6.1 Readiness tecnologica e infrastrutturale: umanoidi vs altre piattaforme	84
6.2 Impatti occupazionali: sostituzione vs complementarità	87
6.3 Impatti ambientali: LCA, consumi energetici ed economia circolare	88

6.4 Il modello Robot-as-a-Service (RaaS)	90
6.5 Limiti dell'analisi e rischi di implementazione	92
7. Conclusioni e Prospettive Future	93
7.1 Sintesi dei risultati	94
7.2 Brownfield vs. Greenfield	95
7.3 Verso la dark-factory	96
7.4 Rischi sociali e considerazioni finali	97
7.5 Limiti dello studio e sviluppi futuri	97
8. Bibliografia e Fonti	100

1. Introduzione

1.1 Contesto e ruolo della robotica avanzata in manifattura

Negli ultimi anni la manifattura ha vissuto una profonda trasformazione digitale, partendo dall'essere definita Industria 4.0, caratterizzata dall'integrazione di tecnologie avanzate nei processi produttivi [1]. In questo panorama, l'advanced robotics ricopre un ruolo fondamentale come motore di produttività e innovazione. Diversamente dai robot industriali più tradizionali, limitati a operazioni ripetitive in ambienti rigidamente controllati, queste più giovani tecnologie robotiche sono flessibili, interconnesse e intelligenti, capaci di adattarsi e cooperare con l'uomo in maniera sicuro [1]. Questo abilita modelli produttivi decisamente più agili, come la mass customization, oltre ad un passaggio dalla manutenzione preventiva a quella predittiva basata su real time data [2]. In generale, questo fenomeno di adozione crescente di robotica avanzata può essere visto come fattore necessario ai fini del mantenimento della competitività industriale, soprattutto in Paesi manifatturieri di punta, come l'Italia. Quest'ultima risulta infatti tra i leader europei per quantità di elementi robot installati: già nel 2022 l'Italia è stata il secondo mercato UE (dopo la Germania) con oltre 11.000 nuovi robot industriali installati (+8% rispetto all'anno precedente) [3], dato che racconta l'elevato grado di automazione raggiunto dallo strato produttivo nazionale. In primo luogo, settori come l'automotive, l'industria meccanica e il packaging (forti in Piemonte, Lombardia ed Emilia-Romagna) hanno già largamente beneficiato di robot fissi e collaborativi; inoltre, la pressione per aumentare ulteriormente efficienza e flessibilità sta aprendo la strada a soluzioni robotiche ancor più raffinate.

In questo contesto spuntano nuove piattaforme di automazione “intelligente” come i robot collaborativi (cobot) e i robot mobili autonomi (AMR), che possono condividere gli spazi con gli operatori umani o movimentare materiali rimanendo indipendenti. Queste tecnologie abilitanti, insieme al progresso nel mondo della sensoristica, capacità di calcolo e algoritmi di AI, stanno trasformando l'organizzazione delle fabbriche moderne [1]. In particolare, ad oggi l'attenzione arriva alla forma di robotica avanzata finora solo teorizzata: i robot umanoidi. Questi sistemi, che uniscono mobilità e destrezza in un corpo antropomorfo, sono considerati da molti osservatori come la frontiera attuale della robotica applicata all'industria [2]. Diverse grandi aziende tecnologiche hanno recentemente annunciato investimenti cospicui in questa direzione, alimentando un forte hype mediatico e aspettative di mercato molto elevate. Ad esempio, Tesla ha svelato il suo prototipo di umanoide Optimus destinato alle proprie linee produttive, sostenendo che in futuro la divisione robotica potrebbe superare il settore auto in termini di business [4].

Analogamente, case automobilistiche come BMW hanno avviato progetti pilota inserendo robot antropomorfi in stabilimento per valutarne l'impiego in compiti di assemblaggio difficili ed ergonomicamente gravosi [5]. Nel settore logistico, operatori globali come GXO stanno testando humanoidi nei magazzini per automatizzare movimenti di picking e handling attualmente svolti da operatori umani. Questi esempi mettono in luce come i robot dalle sembianze umane siano passati rapidamente dalla fantascienza alla realtà prototipale, sostenuti dai recenti avanzamenti nell'AI cognitiva e nei modelli Vision-Language-Action che ne perfezionano percezione e capacità decisionali [4], [5], [6].

1.2 Robotica avanzata, cobot, AMR e humanoidi

Per inquadrare il tema è importante definire i diversi concetti chiave.

Con robotica avanzata si intende un insieme di sistemi robotici di nuova generazione capaci di autonomia decisionale, sensoristica evoluta e spesso collegati in rete. Ne sono esempi i robot collaborativi (cobot), progettati per operare fianco a fianco con l'uomo senza barriere di sicurezza: grazie a sensori e algoritmi di controllo adattivi, i cobot possono rilevare interazioni o urti e fermarsi istantaneamente, abilitando la cooperazione diretta uomo-robot [7]. La loro utilità è basata sull'automazione di compiti ripetitivi a stretto contatto con gli operatori, come nelle catene di montaggio, in cui alleggeriscono il carico di lavoro umano senza rimpiazzarlo completamente. Un'altra categoria è costituita dagli AMR (Autonomous Mobile Robots), veicoli autonomi intelligenti capaci di muoversi all'interno degli stabilimenti per il trasporto di materiali e prodotti. Essi rappresentano l'evoluzione dei più noti AGV, riuscendo a navigare dinamicamente grazie a mappe digitali e tecnologia lidar, e sono strategici per ottimizzare la logistica interna nelle fabbriche flessibili odierne [8]. Sia i cobot che gli AMR sono già realtà piuttosto consolidate in molte imprese manifatturiere e contribuiscono a colmare alcuni scompensi nell'automazione dei reparti produttivi e logistici. Nonostante ciò, essi risolvono solo parzialmente le sfide poste da operazioni più complesse che richiedono versatilità e capacità di adattamento a contesti non strutturati.

I robot humanoidi, quindi, si distinguono come una piattaforma robotica in potenza generalista e versatile: hanno forma antropomorfa, tipicamente bipede e dotata di braccia prensili, progettate per replicare, in parte, le abilità umane in ambienti pensati per l'uomo. L'idea alla base è che un robot con corpo e movimenti simili ai nostri possa utilizzare strumenti e interagire con strutture esistenti senza richiedere riprogettazioni strutturali dell'impianto produttivo. Vale a dire che l'umanoide mira a essere un operaio robotico universale, capace di svolgere molteplici mansioni,

dallo spostamento di carichi all' avvitatura, dal controllo qualità visivo alla gestione di utensili, adattandosi a ruoli molteplici in fabbrica [9], [10]. Ciò lo distingue decisamente dai robot tradizionali usati ad oggi: questi ultimi sono ancora più veloci e precisi ma sono confinati a compiti singoli in celle fisse, mentre un umanoide, grazie a mobilità e intelligenza artificiale, può spostarsi tra postazioni diverse e riconfigurarsi su attività eterogenee in base alle necessità [4].

Per riassumere, i robot umanoidi rappresentano l'apice dell'evoluzione robotica moderna, armonizzando ingegneria avanzata, AI e sistemi autonomi per creare macchine capaci di interagire col mondo umano in modo più fluido e naturale [4], [6]. La loro progettazione si ispira esplicitamente all'anatomia umana, ma il vero salto tecnologico recente consiste nell'integrazione di algoritmi di machine learning di alto livello che permettono a queste piattaforme di imparare e migliorare le proprie prestazioni operando a fianco degli operatori. Si tratta comunque di una frontiera ancora in fase di sperimentazione o comunque presente in soli progetti pilota: gli attuali prototipi di umanoidi mostrano limiti in termini di velocità, autonomia energetica e robustezza, e il loro successo dipenderà dalla capacità di colmare questi deficit ingegneristici nei prossimi anni [11]. D'altra parte, l'interesse nei loro confronti è causato dal potenziale impatto trasformativo che potrebbero avere sui processi produttivi, sul lavoro operaio e non solo.

1.3 Rilevanza e attualità del tema

Un elemento portante di questa sezione è mettere in evidenza la rilevanza e l'attualità del tema dei robot umanoidi nel contesto industriale odierno.

La domanda è: perché proprio ora i robot antropomorfi stanno attraendo così tante risorse e attenzione? La risposta risiede in un insieme di fattori tecnologici e socioeconomici. In primis, si assiste a un forte fattore demografico e del lavoro: a livello internazionale la manifattura subisce una carenza strutturale di manodopera qualificata, dovuta all'invecchiamento della forza lavoro e al ricambio generazionale insufficiente nei mestieri tecnici [10], [12]. Anche in Europa e in Italia questa tendenza è evidente: molti operai specializzati stanno raggiungendo l'età pensionabile e i giovani appaiono poco propensi a intraprendere questo tipo di carriere, viste come faticose e poco attrattive [13]. Ne deriva una difficoltà sempre maggiore per le aziende nel reperire personale operativo: posizioni vacanti che rimangono scoperte, aumento il turnover e i costi di straordinario per coprire i vuoti di personale [14]. Un report Bain prevede che a livello globale potrebbero mancare quasi 8 milioni di operai manifatturieri entro il 2030 rispetto alla domanda stimata [4]. Parallelamente, è presente una forza di tipo economico che riduce i costi operativi e aumenta la produttività in un contesto di concorrenza internazionale e con margini ridotti [15]. Molte imprese

si trovano in una sorta di morsa, a metà tra l'aumento dei costi del lavoro e la necessità di mantenere prezzi competitivi: l'automazione avanzata diventa così una leva quasi obbligata per fare di più con meno.

Questi due fattori, scarsità di lavoratori e ricerca di efficienza, costituiscono il vero motore del rinnovato interesse verso soluzioni robotiche innovative. L' umanoide viene quindi immaginato come una risposta potenziale a questa doppia sfida: da una parte può mitigare la carenza di personale occupandosi di mansioni operative dove non si trovano operatori (diventando una specie di jolly capace di coprire turni o compiti scoperti); dall'altro promette di incrementare la produttività e ridurre i costi nelle attività oggi manuali, essendo capace di operare 24/7 senza cali di attenzione, di standardizzare la qualità ed eliminare errori o fermi dovuti a fattori umani. A fianco di queste motivazioni e necessità di tipo tecnico del settore, ci sono poi le concomitanti evoluzioni tecnologiche che rendono gli umanoidi tecnicamente più vicini alla fattibilità industriale di quanto fossero solo pochi anni fa. In sostanza, si sta creando un ambiente fertile dove la necessità reale (mancanza di personale, richiesta di efficienza) incontra una maturazione delle tecnologie abilitanti.

La rilevanza del tema è attestata anche dai consistenti investimenti e dalle previsioni di mercato: secondo Goldman Sachs il mercato dei robot umanoidi potrebbe raggiungere i 38 miliardi di dollari entro il 2035, mentre altri analisti descrivono scenari ancora migliori, Bain & Company prospetta un range fino a circa 200 Mld \$ nello stesso periodo di tempo [4], a confermare le elevate aspettative a livello globale. Addirittura, ARK Invest ha ipotizzato un impatto economico potenziale di 26 mila miliardi di dollari, nel lungo termine, per questo nuovo trend di automazione [12]. Al di là dei numeri l'attualità dell'argomento trova spazio quasi quotidianamente nelle notizie: start-up e colossi tecnologici lanciano prototipi di umanoidi sempre più perfezionati, e alcune implementazioni iniziano a uscire dai laboratori. In Italia si registrano le prime sperimentazioni sul campo: Oversonic Robotics, PMI innovativa brianzola, ha sviluppato RoBee, il primo robot umanoide progettato e prodotto interamente in Italia, pensato per affiancare gli operatori in attività di linea e già utilizzato in progetti pilota sia manifatturieri sia sanitari [16]. RoBee, alto 1,85 m per 120 kg, è dotato di AI cognitiva e sistemi di visione, ed è in grado di parlare, percepire l'ambiente in cui è inserito e manipolare oggetti; viene presentato come un "cobot antropomorfo" destinato a compiti ripetitivi, pesanti o pericolosi in modo da migliorare sicurezza ed ergonomia senza rimpiazzare completamente l'uomo. Il fatto che una realtà italiana sia entrata in questo segmento è una prova del fatto che il tema riguardi anche il contesto italiano

da vicino: l'ecosistema industriale nazionale vuole capire se gli umanoidi potranno rappresentare una soluzione innovativa per incrementare la competitività e al contempo mitigare problemi storici come gli infortuni sul lavoro [5] e la scarsa attrattività dei ruoli operativi per le nuove generazioni.

1.4 Metodologia di ricerca e struttura della tesi

In base a quanto detto, l'obiettivo di questa tesi è approfondire le potenzialità applicative dei robot umanoidi e provare a capire che impatto possono avere nell'attuale sistema manifatturiero italiano, identificando casi d'uso e valutandone la sostenibilità economico-finanziaria. Nello specifico, si intende discutere contesti in cui l'introduzione di un umanoide possa colmare il gap di automazione attuale, analizzando metriche come costi/benefici, ROI atteso, VAN, TIR e tempo di payback dell'investimento.

Per raggiungere questo scopo, si combina ricerca qualitativa esplorativa e analisi quantitativa: in primo luogo si è svolta una vasta ed eterogenea desk research, consultando fonti sia accademiche che grey literature e rapporti industriali reperiti sul web. Questo approccio è stato necessario vista l'innovatività del tema e la rapidità con cui evolve, con molte informazioni aggiornate disponibili soprattutto tramite articoli tecnici online, white paper aziendali, blog di settore e comunicati stampa, più che su testi accademici tradizionali.

La raccolta dati ha seguito un filo logico predefinito ma in continuo adattamento: inizialmente si è delineato lo stato dell'arte sulle tecnologie di robotica avanzata e sull'evoluzione dei modelli produttivi, per poi concentrarsi sui macro-trend specifici dei robot umanoidi. In questa fase sono stati presi in analisi casi d'uso, con l'obiettivo di identificare le applicazioni più promettenti e valutare, sulla base delle fonti, i relativi criteri di successo. I casi studiati forniscono una base empirica per meglio comprendere "Why humanoids?" e quali problemi reali possono risolvere. Successivamente si è sviluppato il caso applicativo potenziale: si è scelto un processo rappresentativo in una PMI manifatturiera italiana (assemblaggio di componenti elettromeccanici) e si è ipotizzato l'inserimento di un robot umanoide nella linea produttiva esistente. Questo scenario è stato costruito confrontando la situazione attuale (AS-IS) con quella futura automatizzata (TO-BE), stimando parametri operativi sulla base di dati industriali e benchmark tratti da applicazioni robotiche simili e casi ipotetici simili. Su questi dati si è costruita l'analisi economico-finanziaria: sono stati calcolati i flussi di cassa incrementalì legati all'introduzione dell'umanoide (costi di acquisizione, integrazione e gestione contro i risparmi di manodopera, aumenti di output, riduzione scarti, ecc.) e si sono quindi ottenuti indicatori come VAN, TIR e periodo di recupero dell'investimento, per valutarne la convenienza e la coerenza con i risultati

forniti dalle fonti. In ultimo, sono stati considerati gli aspetti qualitativi e i possibili limiti: ad esempio gli impatti organizzativi, le criticità tecnologiche residue e le implicazioni etiche/sociali di una sempre maggiore automazione del lavoro.

2. Background e Stato dell'Arte

2.1 Evoluzione dei modelli di business nel manifatturiero

A partire dall'era preindustriale, la manifattura ha attraversato diverse rivoluzioni nei modi di produrre. Nel modello artigianale preindustriale, la produzione era basata su manodopera altamente qualificata che realizzava prodotti in pezzi unici o piccoli lotti: il valore risiedeva nella personalizzazione e l'alta qualità frutto dell'abilità manuale, a scapito però della scalabilità produttiva e dei costi unitari. Con la Prima e Seconda Rivoluzione Industriale arriva la produzione di massa: l'introduzione della macchina a vapore prima e della catena di montaggio fordista poi hanno permesso di standardizzare i prodotti e realizzarli in grandi volumi a costi sempre più ridotti. Il focus del valore si è spostato sull'efficienza e la scala: dalla bottega artigiana si passa alla fabbrica con linee apposite, dove la manodopera è composta da compiti ripetitivi su prodotti omogenei. Questo modello ha migliorato la produttività ma è andato a sacrificare la flessibilità e la varietà dell'offerta [17].

A metà del '900, per cercare di risolvere i limiti del fordismo, è emersa la lean production (produzione snella), sviluppato da Toyota. La lean production puntava all'eliminazione assidua degli sprechi e delle attività non a valore aggiunto lungo tutta la catena del valore, coinvolgendo i lavoratori nel miglioramento continuo e standardizzando i processi [18]. Ciò ha permesso di ottenere efficienza e qualità superiori pur con lotti più piccoli e maggiore varietà di prodotti, facendo sì che la produzione fosse più vicina alle esigenze del cliente e in generale del mercato. Il modello lean, grazie a tecniche come il just-in-time e il jidoka, ha permesso un nuovo modo di creare valore ovvero non più solo volume, ma anche flessibilità, qualità e riduzione dei costi grazie al kaizen, ossia miglioramento continuo. Tuttavia, con l'aumentare della complessità dei prodotti e dei mercati globali, anche la produzione snella ha mostrato dei limiti. Molte aziende hanno imparato che i soli principi lean non bastavano per vincere la crescente complessità operativa e la necessità di riconfigurare rapidamente i processi [18].

Seguendo l'evoluzione di questi modelli si arriva alla produzione digitale nell'Industria 4.0, detta anche quarta rivoluzione industriale. Questo paradigma, nato intorno agli anni '10 del 2000, integra una serie di tecnologie avanzate, dalla robotica evoluta all'Industrial Internet of Things

(IIoT), dalla manifattura additiva ai big data analytics, fino al cloud computing e all'intelligenza artificiale, per realizzare fabbriche connesse e intelligenti [18]. Sensori, macchine e sistemi informativi interconnessi creano un sistema capace di raccogliere e analizzare real time data, gestendo autonomamente il processo produttivo. L'introduzione di robotica avanzata in questo caos è un aspetto fondamentale: i robot industriali di nuova generazione dotati di capacità avanzate, tra cui visione artificiale, maggiore destrezza e capacità di apprendimento, sono capaci di operare 24/7 con alta precisione, portando la produttività ben oltre i limiti delle linee tradizionali. A differenza dei vecchi macchinari isolati, questi sistemi collaborano e adattano la produzione in maniera dinamica, permettendo ad esempio di passare dalla manutenzione preventiva a quella predittiva, basandosi su dati in tempo reale [18]. Industria 4.0 ha quindi reso possibili nuovi modelli di creazione del valore: la mass customization o personalizzazione di massa, ovvero la produzione di oggetti altamente customizzati con l'efficienza della produzione di massa, è diventato possibile grazie a linee flessibili riconfigurate dai robot e gestite da software intelligenti. Inoltre, si affacciano nuovi modelli di business come il Robotics-as-a-Service, in cui le aziende manifatturiere ottengono tramite leasing capacità robotiche in cloud invece di investire interamente in costosi impianti proprietari [7]. Questo concetto è molto importante proprio perché permette di ridurre le barriere d'ingresso tecnologiche, trasformando parzialmente i costi da capex a opex e rendendo più accessibile l'automazione avanzata, altrimenti possibile solo a grandi aziende con maggior capacità ad investire.

Oggi, invece, emerge il modello di Industria 5.0, una visione manifatturiera che va oltre alle sole efficienza e capacità tecnico-economica. Industria 5.0 mette l'essere umano al centro del processo produttivo, dando valore alla creatività, all'intelligenza e al benessere, e mirando a una produzione sostenibile e resiliente per la società [19]. In altre parole, non si parla solo di un'ulteriore automazione, bensì di una collaborazione più stretta tra l'uomo e le tecnologie avanzate.

Questo nuovo modello si basa anche su un concetto di coesistenza sinergica tra operatori umani e sistemi robotici intelligenti: l'obiettivo è quello di far ricoprire i compiti gravosi, ripetitivi e pericolosi alle macchine, liberando le persone per attività a più alto valore aggiunto [20]. I robot collaborativi e gli humanoidi possono diventare, come in questi casi, strumenti per potenziare l'operato dell'uomo, non per sostituirlo. Allo stesso tempo, Industria 5.0 si prende anche a cuore temi come la sostenibilità ambientale e sociale considerando processi a basso impatto, economia circolare, riduzione degli sprechi energetici e materiali, e attenzione al benessere dei lavoratori non sono più aspetti secondari ma obiettivi esplicativi [20]. In sintesi, mentre Industria 4.0 ha portato l'integrazione digitale spinta e l'automazione diffusa, Industria 5.0 completa la visione

aggiungendo la centralità dell'uomo, la personalizzazione estrema dei prodotti (addirittura arrivando al “lotto uno” su misura del cliente) e il contributo attivo dell’industria a obiettivi di sostenibilità [20]. Per le imprese manifatturiere, questo comporta modelli di creazione del valore più ampi: il valore non è dato solo da produttività e qualità, ma anche dalla capacità di innovare con i lavoratori, offrendo prodotti eco-sostenibili e adattandosi velocemente ai cambiamenti grazie a sinergie uomo-macchina agili; quindi, questo modello si posiziona perfettamente al centro di un mondo in continuo e rapido cambiamento il cui la domanda di mercato non guarda solo il prodotto fisico ma anche tutto il contesto intorno ad esso, come ad esempio appunto la sostenibilità.

In questo percorso di evoluzione, dall’artigianato all’industria 5.0, la robotica avanzata assume un ruolo sempre più portante. Se nelle botteghe artigiane il know-how era solamente umano, e nella produzione di massa classica i robot praticamente non esistevano, con la lean production si sono visti i primi robot industriali integrati nelle linee, soprattutto per operazioni ripetitive (il primo robot Unimate fu installato da General Motors nel 1961 [21]). È però con l’Industria 4.0 che i robot diventano protagonisti della fabbrica: non più macchine ingabbiate e isolate, bensì sistemi connessi, intelligenti e spesso collaborativi [20]. Oggi i robot sono maggiormente versatili e agili: grazie a sensori avanzati, visione artificiale e algoritmi di AI, possono adattarsi al contesto e lavorare fianco a fianco con gli operatori in modo sicuro. Questa integrazione totalizzante della robotica nei modelli di business manifatturieri porta con sé implicazioni profonde sulla catena del valore: da una parte aumenta decisamente la produttività e la precisione; dall’altro abilita nuovi servizi attorno al prodotto (manutenzione intelligente, produzioni on-demand) e trasforma l’organizzazione del lavoro (team ibridi uomo-robot, fabbriche “lights-out” senza presenza umana per certe lavorazioni e processi). In futuro, il modello Industria 5.0 prefigura fabbriche in cui l'uomo rimane insostituibile per questioni come la creatività e le decisioni etiche, mentre i robot avanzati diventano partner che amplificano capacità produttive e di ragionamento. In questa maniera, la creazione di valore industriale diventa un processo condiviso uomo-macchina, che porta benefici sia economicamente (maggiore flessibilità, personalizzazione e rapidità di risposta al mercato) sia socialmente (lavoro più sicuro, valorizzazione del capitale umano) [22].

2.2 Situazione AS-IS della robotica avanzata nel mondo

Globalmente, l’adozione della robotica industriale ha raggiunto volumi senza precedenti, con una crescita significativa concentrata negli ultimi anni. Nel 2022 le installazioni di nuovi robot industriali nel mondo hanno toccato il record di 553.000 esemplari, superando per il secondo anno consecutivo il limite precedente del mezzo milione (+5% sul 2021) [1]. Questo slancio è portato

avanti principalmente dall'Asia, che da sola ha rappresentato circa il 73% dei robot installati nel 2022 (Cina leader mondiale), mentre Europa e Americhe a seguire con percentuali piuttosto inferiori (rispettivamente 15% e 10%) [1]. Ma al di là della ripartizione geografica, è interessante analizzare quali settori industriali stanno utilizzato maggiormente i robot e con quali tendenze.

Storicamente il settore Automotive è stato quello che più utilizzava robot industriali, essendo l'automobile un prodotto complesso assemblato solitamente in grandi volumi. Ancora oggi l'automotive detiene una cospicua quota: a livello mondiale nel 2022 sono stati installati circa 136.000 robot nelle fabbriche automotive, in forte crescita (+16% rispetto all'anno precedente) grazie al ritorno ad investire soprattutto in Asia e Nord America [7]. Effettivamente, dopo un periodo di rallentamento, le case produttrici di auto stanno tornando ad automatizzare in maniera massiccia, ad esempio per le nuove linee di veicoli elettrici (che richiedono processi produttivi innovativi e rapidi adattamenti). Negli Stati Uniti, le vendite di robot all'industria automobilistica nel 2022 sono cresciute del +47% rispetto al 2021, tornando a costituire quasi il 40% di tutti i robot venduti nel Paese [7]. Questo significa che l'automotive resta un pilastro della robotica avanzata, inserendo robot in fabbrica, principalmente in assemblaggio scocche, saldatura, verniciatura e movimentazione. Ciò nonostante, negli ultimissimi anni un altro settore ha superato l'automotive per numero di robot installati annualmente: l'elettronica. Nel 2022, il settore elettronico ha raggiunto l'installazione di circa 157.000 nuovi robot nel mondo, in crescita del +10%, risultando il comparto più robotizzato in assoluto [7]. Questo è dovuto alla fortissima automazione nelle fabbriche di semiconduttori, dispositivi elettronici di consumo e pannelli fotovoltaici, principalmente in Asia (Cina, Corea del Sud, Taiwan): questi prodotti hanno bisogno di elevata precisione, ambienti controllati e velocità produttiva, condizioni dove i robot risultano perfettamente adatti.

A parte automotive ed elettronica, che insieme formano la maggior parte dell'impiego di robot industriali, altri settori manifatturieri stanno incrementando l'automazione, anche se con volumi minori. Ad esempio, il settore dei metalli e macchinari e quello chimico-plastico utilizzano robot per operazioni di manipolazione di pezzi pesanti, di verniciatura e di stampaggio; tuttavia, nel 2022 questi comparti hanno visto una lieve flessione nelle installazioni globali di robot (-3% metalli/macchinari, -6% plastica/chimica) [7], segno di un ritmo più costante nell'adozione dopo crescite passate. Anche l'alimentare inizia ad automatizzare, pur registrando un leggero calo nel 2022 (-2%) [7], probabilmente per via di investimenti momentaneamente posticipati in alcuni Paesi.

Un ambito da mettere in risalto a parte è quello della logistica e dei magazzini, che spesso non viene presa in considerazione nelle statistiche di robot industriali tradizionali ma utilizza robot mobili e sistemi automatici in rapida diffusione. Dal 2020 in poi, grazie alla spinta dell'e-commerce e alla carenza di manodopera, l'adozione di robot di movimentazione nei centri di distribuzione è esplosa. Si tratta principalmente di veicoli autonomi (AGV/AMR) utilizzati per il trasporto interno di merci, smistamento pacchi e asservimento scaffali. Aziende leader, come ad esempio Amazon, oggi operano con vere "flotte robotiche": nel 2023 Amazon ha superato quota 750.000 robot mobili e bracci automatici operanti nei propri centri logistici in tutto il mondo [23]. Questi robot, ad esempio tipo "Kiva/Hercules" che trasportano scaffali verso gli operatori, o sistemi avanzati di smistamento come "Sequoia", hanno permesso un aumento nell'efficienza di magazzino di circa il 25% nelle strutture di nuova generazione [23]. Anche in contesti industriali, la logistica interna è sempre più affidata a robot mobili: i tradizionali carrelli automatici (AGV) evolvono in Autonomous Mobile Robots (AMR) capaci di navigazione intelligente, evitando ostacoli e coesistendo con gli operatori umani [20] e ancora possono trasformarsi in mobile manipulators, combinando l'aspetto del AMR con quello del cobot. Questa trend pone rimedio ai pain point comuni nei magazzini e reparti spedizioni: alto livello di ripetitività del lavoro, sforzo fisico e difficoltà a reperire addetti disposti a questo tipo di mansioni. Non è casuale che si registri un forte interesse per i robot mobili in ambienti indoor quotidiani, specialmente nella logistica, a causa di una grave carenza di personale [7].

In conclusione, la logistica automatizzata è parte integrante dello stato dell'arte della robotica avanzata, pur essendo spesso classificata nel segmento dei robot di servizio professionale. Nel 2022 le vendite di robot di servizio per uso professionale (che includono logistica, pulizia, ispezione, ecc.) sono cresciute del +48%, raggiungendo 158.000 unità globali [7], un indicatore della forte domanda di automazione non solo sulle linee produttive classiche, specialmente per tentare di lenire il problema della carenza di manodopera in lavori onerosi, tema portante tra le cause che stanno spingendo il settore manifatturiero ad investire in robotica avanzata.

Nonostante questi progressi impressionanti, la situazione attuale della robotica mondiale pone anche pain points e ostacoli che rallentano un'adozione ancor più estesa. Uno dei principali è il costo iniziale elevato di implementazione. L'investimento in queste tecnologie può risultare molto complicato per molte PMI. Ad esempio, fonti di settore indicano che il costo capitale dei robot rimane una barriera significativa, specialmente per imprese con volumi produttivi medio-bassi [24]. Ciò nonostante, va preso in considerazione che questa barriera si sta riducendo sempre più

con il tempo: il prezzo medio di un robot industriale è in diminuzione e risulta dimezzato negli ultimi dieci anni [25], grazie a economie di scala in produzione e all'arrivo di nuovi fornitori (in particolare cinesi) che permettono abbassamenti dei prezzi.

Un secondo limite è la carenza di competenze e know-how all'interno delle aziende. Introdurre robotica avanzata necessita di ingegneri e tecnici specializzati in automazione, programmazione e manutenzione di questi stessi sistemi. Molte aziende, in particolare nelle economie emergenti o tra le PMI, confermano la mancanza di esperienza interna nell'automazione e difficoltà a trovare personale qualificato [24]. Questo rallenta i progetti di adozione perché le aziende non si sentono pronte a gestire tecnologie complesse senza un supporto esterno.

Un altro pain point risiede nell'integrazione dei robot nei processi attuali: molte fabbriche hanno layout, flussi produttivi e macchinari preesistenti non progettati per questo tipo di automazione collaborativa. Inserire nuovi robot può richiedere di rivedere l'organizzazione del lavoro, mantenendo sicurezza e fluidità nella produzione. Anche se tecnologie come i cobot sono progettate per essere flessibili, la riconfigurazione dei processi comporta investimenti di tempo e spese in reingegnerizzazione e tests [22]. Questo potrebbe non sussistere per sistemi di robotica più avanzata come, ad esempio, quella umanoide, proprio in virtù delle caratteristiche che la definiscono. Inoltre, nelle applicazioni di robotica collaborativa o di servizio, emergono problematiche normative e di sicurezza: assicurare che queste tecnologie operino senza barriere tra i lavoratori richiede di essere conformi a standard stringenti e aggiornamenti normativi, ancora in via di definizione in alcuni paesi.

Accanto ai pain points si possono però trovare grandi opportunità di innovazione nel periodo 2023-2025 che stanno stimolando ulteriormente la robotica avanzata. Una di queste è la spinta post-pandemica: il Covid-19 ha messo in evidenza alcune debolezze delle catene produttive globali e la carenza di manodopera disponibile, soprattutto in lavori manuali ripetitivi. Molte aziende, per essere operativamente più resilienti, stanno velocizzando gli investimenti in automazione per ridurre la loro dipendenza dal lavoro umano in attività non strategiche. Contemporaneamente, la pandemia e le tensioni geopolitiche hanno innescato fenomeni di reshoring, ovvero rilocalizzazione della produzione nei Paesi d'origine [25]. In questo caso, per mantenere la competitività nonostante i costi del lavoro siano maggiori, le fabbriche che ritornano, ad esempio, dall'Asia all'Europa dovranno necessariamente implementare più robotica e sistemi avanzati, per compensare con la tecnologia l'aumento del costo del lavoro e, come già citato in precedenza, la sua carenza.

Un'altra opportunità chiave è l'evoluzione tecnologica rapidissima in corso: i progressi nell'Intelligenza Artificiale, in particolare nell'ambito della visione artificiale e del machine learning, stanno rendendo i robot molto più intelligenti e autonomi [7]. Ad esempio, algoritmi AI consentono oggi ai robot di imparare a manipolare oggetti nuovi tramite simulazioni trial-and-error, o di ottimizzare automaticamente le proprie traiettorie, andando a ridurre moltissimo tempi di programmazione e aumentando la flessibilità. Questo significa potrebbe diventare possibile che compiti finora non automatizzabili (perché troppo complessi o variabili) inizino ad essere svolti dai robot nei prossimi anni, aprendo nuovi scenari applicativi. L'AI inoltre potenzia la manutenzione predittiva dei robot stessi, migliorandone uptime e affidabilità in produzione [7]. Un ulteriore driver è la riduzione delle dimensioni e la crescente capacità collaborativa di questi macchinari: i cobot leggeri a basso costo, gli esoscheletri robotici indossabili per assistere i lavoratori, i robot mobili per asservimento macchina sono soluzioni che permettono di automatizzare anche piccole postazioni o aiutare direttamente l'operatore senza dover rifare l'intera linea. Queste innovazioni potrebbero attrarre particolarmente le PMI manifatturiere, che potrebbero introdurre automazione in maniera modulare, su specifiche fasi critiche del loro processo industriale. Infine, va considerato il ruolo delle politiche industriali e incentivi che in molti Paesi stanno sostenendo l'adozione di robotica avanzata, mitigando il rischio di investimento e accelerando il time-to-value dei progetti piloti.

2.3 Tecnologie abilitanti

L'ecosistema della robotica avanzata si basa su una serie di tecnologie chiave (hardware e software) che, integrandosi, permettono applicazioni sempre più raffinate in ambito manifatturiero.

Robot Collaborativi (Cobot): i cobot sono robot progettati per operare a stretto contatto con l'uomo in maniera sicura, condividendo lo stesso spazio di lavoro senza necessitare di barriere fisiche. A differenza dei robot industriali tradizionali, solitamente veloci e potenti ma chiusi in gabbie per motivi legati alla sicurezza, i cobot sono generalmente più leggeri, vestono sensori di forza e sistemi di arresto immediato per evitare di ledere agli operatori. Questa sensibilità permette ai cobot di percepire contatti o collisioni e di reagire limitando la forza, come secondo le norme ISO sull'interazione uomo-robot [26]. LBR iiwa di KUKA, Universal Robots UR5/UR10, Fanuc CRX, ABB YuMi sono esempi noti di bracci collaborativi.

In ambito manifatturiero i cobot trovano impiego in operazioni che beneficiano della flessibilità umana congiunta alla precisione e forza del robot: avvitatura e assemblaggio di componenti (dove

l'operatore esegue attività di destrezza e il cobot funge da terza mano o effettua inserimenti ripetitivi), gestione e movimentazione di pezzi pesanti o scomodi (il robot solleva e posiziona, l'operaio regola o controlla), alimentazione macchine CNC, finitura superficiale, ispezione qualità con visione, packaging e palletizzazione in fine linea. Un caso emblematico è l'installazione di cobot nelle linee di montaggio automotive BMW: a Dingolfing un cobot LBR iiwa sospeso solleva e posiziona carter del differenziale permettendo all'operatore di evitare uno sforzo ripetitivo; il tutto senza recinzioni, con il robot che lavora a velocità ridotta e arresto immediato nel caso ci sia un contatto [22]. Il vantaggio per BMW è duplice: miglior ergonomia per i dipendenti, che possono continuare in mansioni produttive nonostante l'età avanzata o limitazioni fisiche, e maggiore qualità/precisione nella mansione grazie alla stabilità del robot (che elimina micromovimenti involontari) [22]. I cobot sono quindi abilitanti al fine di un'automazione flessibile: la loro semplicità nell'essere riprogrammati e la possibilità di riposizionarli in diversi punti, rendono economico automatizzare anche produzioni di lotti medio-piccoli, seguendo i principi della lean production. Non è casuale quindi che la quota di mercato dei cobot sia in rapida crescita: nel 2022 le installazioni di robot collaborativi hanno superato le 55.000 unità (+31%), raggiungendo il 10% di tutti i robot industriali venduti [7]. Nel 2025, invece, si prevede che il mercato globale dei robot collaborativi raggiungerà circa 735.000 unità. Questo si traduce in una dimensione del mercato di circa 12,83 miliardi di dollari USA, secondo Statista [27].

Robot mobili autonomi (AMR) e AGV: per l'automazione della movimentazione interna di materiali, le tecnologie abilitanti principali sono i veicoli a guida automatica (AGV) e la loro diretta evoluzione, gli autonomous mobile robots (AMR). Gli AGV esistono da decenni: sono veicoli (spesso simili a carrelli o piccoli robot su ruote) che seguono percorsi prestabiliti, ad esempio tramite bande magnetiche o fili interrati nel pavimento, oppure linee verniciate o QR code, e trasportano carichi da un punto all'altro di un impianto. Gli AGV tradizionali però hanno intelligenza limitata: operano in ambienti strutturati e se dovessero incontrare un ostacolo si fermerebbero in attesa che esso venga rimosso. Gli AMR, invece, integrano sensori avanzati (lidar, telecamere 3D) e algoritmi di navigazione SLAM che gli permettono di muoversi in modo autonomo e dinamico, senza vincolarsi a un'unica traiettoria fissa. Un AMR è in grado di mappare l'ambiente, pianificare percorsi ottimali ed evitare in tempo reale ostacoli fissi o mobili (persone, carrelli) deviando il percorso. Praticamente, dove l'AGV è “cieco” e limitato, l'AMR è “intelligente” e capace di adattarsi. Questa evoluzione è possibile dalla combinazione di AI e visione artificiale: ad esempio, gli AMR montano scanner laser e camere che alimentano algoritmi di riconoscimento ostacoli/persone e di decisione su come reagire (rallentare, fermarsi o aggirare)

[7]. Inoltre, un AMR può essere locato in ambienti diversi con configurazione richiesta minimale, mentre un AGV richiede l'installazione di guide o marker. Nelle fabbriche manifatturiere, AMR e AGV automatizzano la logistica interna: fornitura delle linee di montaggio (trasporto di componenti dal magazzino alle stazioni), rimozione di prodotti finiti o scarti, collegamento tra reparti. Un modo molto utilizzato è l'uso di piccoli AMR nelle linee lean che segue l'operatore lungo la linea portando un carrello con parti, fermandosi a ogni postazione dove l'operatore preleva i pezzi necessari, andando così ad eliminare i tempi di andata/ritorno in/dal magazzino. Nella logistica di magazzino, come già accennato, gli AMR (spesso sotto forma di robot piatti che sollevano interi scaffali) permettono il modello “good-to-person”. Ad esempio, Amazon utilizza moltissime unità di robot Hercules (derivati dei Kiva) che scorrono sotto gli scaffali modulari, li sollevano e li trasportano verso le postazioni di picking dove l'operatore preleva l'articolo necessario. Questo ha incrementato la velocità di evadere gli ordini e allo stesso tempo migliorato l'ergonomia, visto che i lavoratori non devono più correre tra gli scaffali ma ricevono la merce ad altezza ergonomica [23].

Nelle realtà produttive, un noto esempio di integrazione AMR è la fabbrica Siemens ad Amberg, dove AGV/AMR trasportano autonomamente le schede elettroniche e componenti da una stazione all'altra nel flusso di produzione, con routing ottimizzato grazie al MES (Manufacturing Execution System) centrale (sistema che rientra in concetti di fabbrica autonoma) [8]. In generale, l'utilizzo di AMR permette di ottenere flessibilità logistica: le linee produttive non sono più vincolate da nastri trasportatori fissi, ma possono essere riorganizzarsi rapidamente cambiando i percorsi dei robot mobili. In più, in ottica Industria 4.0, gli AMR provvedono all'invio di dati in tempo reale riguardanti il flusso di materiali e sullo stato dei trasporti, integrandosi con il potenziale digital twin logistico dell'impianto. Ad oggi, il trend vede un aumento esponenziale degli AMR nelle fabbriche e magazzini: le vendite mondiali di unità di logistica autonoma sono in forte crescita e nuovi attori stanno entrando nel mercato. Ciò nonostante, restano alcune sfide tecniche (gestione sicura di flotte miste uomo/macchine, ottimizzazione del traffico quando sono presenti decine di robot, cybersecurity delle comunicazioni). Per affrontarle, grandi attori di settore come Siemens stanno sviluppando piattaforme software per l'orchestrazione di flotte e soluzioni di sicurezza evolute: ad esempio, Siemens ha annunciato nel 2025 un sistema di Operations Copilot con “agenti AI” per facilitare la configurazione e gestione di flotte di AMR/AGV, nonché un software Safe Velocity per monitorare in modo fail-safe la velocità e i campi laser dei robot mobili, migliorando la sicurezza senza hardware addizionale [8]. Queste innovazioni abilitanti fanno sì che l'utilizzo di AMR sia sempre più plug&play e sicuro, accelerandone l'adozione nelle fabbriche.

Robot Umanoidi: categoria emergente nella robotica avanzata è quella dei robot umanoidi, ovvero robot con sembianze antropomorfe (braccia, busto e spesso gambe) pensati per svolgere compiti in ambienti progettati per l'uomo. Mentre i robot industriali tradizionali e i cobot sono generalmente macchine fisse o mobili a struttura non antropomorfa (bracci, veicoli, ecc.), l'umanoide ambisce a replicare movimenti e abilità umane in modo versatile. Le tecnologie abilitanti in questo caso includono: avanzamenti in meccatronica (attuatori compatti ad alta potenza, giunti snodati multipli), controllo dell'equilibrio e locomozione (per i bipedi, algoritmi che consentono di camminare e salire scale), manipolazione avanzata (mani robotiche con dita multiple e tatto), e soprattutto integrazione di AI cognitiva per percepire l'ambiente e operare azioni complesse. I robot umanoidi di ultima generazione, come Agility Robotics "Digit", Tesla "Optimus" o Boston Dynamics Atlas (ancora prototipali in diversi casi), rappresentano piattaforme sperimentali ma con potenziale, e spesso intenzionalità, industriale.

Nell'ambito manifatturiero, un robot umanoide si presenta come "operaio robotico" capace di muoversi all'interno degli impianti già esistenti e di impiegare utensili concepiti per l'operatore umano, introducendo l'automazione in aree finora inaccessibili senza riprogettare gli impianti e sfruttando, dopo un opportuno adattamento, le strutture vigenti. Tesla Optimus, per esempio, è concepito per svolgere compiti logisti elementari nelle Gigafactory Tesla: potrebbe prelevare parti da contenitori, avvitare componenti con utensili manuali standard, oppure rifornire linee come farebbe un operatore [28]. Tra le visioni a lungo termine riguardanti queste tecnologie troviamo quella del robot antropomorfo che può adattarsi ad una moltitudine eterogenea di task e ai layout attuali (scale, porte, scaffali) senza attrezzature speciali.

Tra i principali benefici attesi ci sono il funzionamento 24/7 nelle mansioni di bassa qualificazione, riduzione dei rischi per gli umani (umanoidi impiegati in ambienti pericolosi o in turni notturni), aumento della produttività. Ad oggi gli umanoidi sono in fase di test in alcune realtà come la stessa BMW che sta sperimentando l'impiego di prototipi di umanoidi (ne è da esempio il Figure 02 di Figure A1) su linee di montaggio, testando la capacità di questi robot di inserirsi in stazioni dove sono necessarie flessibilità e adattabilità simili a quelle umane [29]. I primi risultati mostrano che l'umanoide ha ancora alcuni limiti, ma progressi rapidi sono attesi dal punto di vista di software di controllo, destrezza e autonomia. Per quanto riguarda le tecnologie abilitanti, l'umanoide funge da banco di prova avanzato per: sistemi di bilanciamento dinamico (camminata robotica robusta), machine learning per destrezza (far apprendere manipolazioni complesse usando reti neurali), integrazione di visione 3D e riconoscimento oggetti per agire in ambienti non strutturati. Queste

stesse tecnologie, evolvendo e maturando, possono ricadere positivamente anche su cobot e altri robot (ad es. mani robotiche avanzate potranno essere usate su bracci fissi). Nel contesto manifatturiero italiano, gli umanoidi potrebbero in futuro rappresentare un jolly per certi compiti generici oggi svolti manualmente in molti settori, dalla movimentazione di materiale tra reparti nelle PMI, all’asservimento di macchine in officine con diverse linee di produzione, purché i costi si riducano e l’affidabilità sia dimostrata. Attualmente i costruttori mirano a rendere disponibili i primi umanoidi commerciali entro pochi anni, inizialmente per applicazioni logistiche e di servizi generali in fabbrica. L’Italia segue con interesse: diverse aziende e centri di ricerca come IIT e Oversonic stanno sviluppando prototipi di robot umanoidi o bipedi, immaginando i loro impieghi in fabbriche flessibili e come “blue collar robots” per rispondere in prima battuta alla carenza di manodopera specializzata in alcuni ruoli.

Intelligenza Artificiale (AI) e Machine Learning: l’AI è un abilitatore trasversale connessa ormai tutti gli aspetti della robotica avanzata. Nel manifatturiero si possono distinguere diverse applicazioni dell’AI: perception, decision-making e control.

Per quanto riguarda la percezione, algoritmi di visione artificiale basati su AI permettono ai robot di riconoscere oggetti, persone, difetti sui pezzi, con accuratezza e robustezza molto superiori ai sistemi di visione tradizionali [30]. Ad esempio, in un impianto di assemblaggio schede elettroniche, una telecamera controllata da AI può ispezionare saldature e componenti identificando piccole anomalie che sfuggirebbero a controlli manuali, migliorando la qualità. Oppure, bracci robotici con visione 3D AI riescono a fare il bin picking (prelevare oggetti disordinati da un contenitore) individuando la posizione e l’orientamento dei pezzi random, cosa prima impossibile.

Sul fronte decisionale, l’AI permette di pianificare e ottimizzare le operazioni dei robot e dell’impianto: ad esempio algoritmi di reinforcement learning fanno apprendere ai robot come muoversi in maniera ottimale andando a ridurre vibrazioni o consumi [31]; sistemi AI organizzano in tempo reale le attività di più robot in una linea per minimizzare gli idle times, oppure ricalcolano il bilanciamento linee al variare degli ordini [32]. Un concetto degli ultimi anni è la fabbrica autonoma intelligente, dove un supervisore AI monitora l’intero processo produttivo (dai sensori IoT dei macchinari ai sistemi gestionali) e prende decisioni automatiche per adattare la produzione a condizioni mutevoli, ad esempio ridistribuisce compiti tra robot se rileva un guasto, o cambia i parametri di assemblaggio se i sensori qualità iniziano a registrare anomalie. Infine, nell’ambito del controllo, l’AI viene incorporata nei controllori dei robot per migliorarne le prestazioni base:

esistono controlli adattativi con alla base reti neurali che rendono i robot più precisi e veloci, oppure algoritmi predittivi che smorzano vibrazioni durante movimenti più rapidi. Interessante in maniera particolare è l'applicazione dell'AI alla manutenzione: analizzando i dati dei sensori (correnti, temperature, rumori) con algoritmi di machine learning, è possibile prevedere guasti prossimi ad accadere e organizzare interventi prima che dei blocchi produzione, aumentando l'uptime [33]. L'IFR mette in luce proprio come l'AI stia rendendo l'automazione più "smart", accelerando la programmazione, migliorando la manutenzione e dando supporto alla sostenibilità ottimizzando l'uso delle risorse [7].

Un esempio concreto è Fanuc che ha sviluppato un software AI Servo Monitor che analizza in continuo le prestazioni dei motori dei robot per notare se ci dovessero essere anomalie e inviare alert per la manutenzione [34]. In ambito produttivo italiano, l'AI è già impiegata in varie forme: dai cobot intelligenti che riconoscono la presenza dell'operatore e adattano la velocità, di conseguenza, ai sistemi di computer vision per il controllo qualità nel food & beverage venendo utilizzate, ad esempio, nel rilevare in maniera automatica imperfezioni nelle bottiglie su linee di imbottigliamento, fino ai digital twin con AI che simulano e ottimizzano l'intero stabilimento. Inoltre, l'arrivo dei modelli di AI generativa abiliterà interfacce uomo-robot più naturali (programmazione di un robot descrivendogli a parole il compito da svolgere) e sistemi di supporto alle decisioni per i manager di stabilimento (analisi di grandi di big data di produzione per suggerire miglioramenti).

Per concludere, l'AI rappresenta la mente che permette ai robot e alle fabbriche di essere non solo automatiche, ma anche potenzialmente autonome e intelligenti, potendo apprendere e migliorare nel tempo. Come si sta osservando, questi sistemi stanno progredendo molto velocemente, si parla infatti di un'ulteriore pervasività dell'AI: il connubio tra AI e robotica è spesso definita "embodied AI", a sottolineare che il robot è un corpo la cui intelligenza è data dall'AI software [25]. Questa simbiosi apre la strada a nuovi livelli di produttività e qualità.

Industrial Internet of Things (IIoT): l'IoT industriale è il potente catalizzatore di trasformazione della fabbrica di oggi. Consiste nella rete di sensori intelligenti, dispositivi connessi e sistemi di comunicazione che collegano macchine, robot, prodotti e persone, permettendo uno scambio continuo di dati. L'abilitazione IIoT è fondamentale perché consente di monitorare e controllare il processo produttivo in tempo reale, alimentando sia i sistemi AI appena citati, sia la visibilità gestionale.

Tra i componenti principali dell’IIoT si trovano: sensori avanzati (di posizione, temperatura, vibrazione, corrente, visione, ecc.) installati su impianti e robot; connettività robusta all’interno della fabbrica; piattaforme di edge computing e gateway IoT che raccolgono i dati grezzi dalle macchine e li elaborano; infine, sistemi cloud/enterprise dove i dati sono aggregati, analizzati e integrati con il gestionale aziendale di turno. L’IIoT rende possibili applicazioni come: monitoraggio remoto delle linee (ogni robot trasmette parametri del proprio funzionamento che gli operatori possono visualizzare grazie a dashboard), tracciabilità totale dei prodotti (ogni pezzo comunica attraverso tecnologia RFID o seriali e potendo conoscerne lo storico di produzione), manutenzione predittiva, ottimizzazione energetica (sensori IoT sui consumi permettono di gestire accensioni/spegnimenti e ridurre sprechi). In una smart factory tipo, un braccio robotico di assemblaggio è rifornito di decine di sensori e attuatori connessi: il braccio comunica con i sistemi di controllo e gestione attraverso un flusso continuo e consistente di dati in tempo. Tutto ciò rende possibile implementare il concetto di trasparenza in fabbrica: il management può conoscere in tempo reale le prestazioni produttive e reagire di conseguenza [35].

Un esempio concreto di IIoT applicato è il sistema di monitoraggio remoto Fanuc MTLinki che collega sia robot Fanuc sia macchine CNC (è compatibile anche con macchine di produttori terzi) in un’unica rete e fornisce analisi di performance e diagnostica centralizzata [34]. Grazie a questo tipo di soluzioni è possibile avvicinarsi a quell’idea di “Lights-Out Manufacturing” in cui impianti interconnessi possono essere supervisionati e gestiti anche da remoto con un minimo intervento umano richiesto. È importante citare anche il ruolo dell’IIoT nell’integrazione orizzontale e verticale: nell’orizzontale collega tra loro macchine di reparti diversi, fornitori e subfornitori della supply chain digitale (es. il livello di magazzino materie prime di un fornitore comunicato in tempo reale al cliente per riordini automatici just-in-time); nel verticale integra il livello operativo, controllo, esecuzione e planning attraverso un flusso continuo di informazioni. L’integrazione IIoT è uno dei pilastri di Industria 4.0 [18] e rappresenta in sostanza il sistema percettivo digitale della fabbrica: se c’è un problema o un’inefficienza, i sensori IoT lo rilevano e segnalano, in modo da reagire e correggere la situazione in maniera rapida.

Digital Twin e simulazione: il Digital Twin (gemello digitale) è una tecnologia abilitante sempre più importante per l’advanced robotics e dell’Industria 4.0 [36], [37]. Consiste nella creazione di un modello digitale molto accurato di un oggetto fisico, processo o intero sistema produttivo, che rispecchia in tempo reale (o quasi) lo stato e il funzionamento del gemello reale. Nel manifatturiero ciò significa poter avere una sorta di clone virtuale di una cella robotizzata, di una linea o persino

di una fabbrica intera, con il quale simulare operazioni, fare test per cambiamenti e progetti di innovazione e prevedere performance. I digital twin sfruttano i dati raccolti dall'IoT: il gemello digitale di un robot, ad esempio, riceve continuamente i dati di posizione giunti, velocità, temperature dal robot fisico e ne aggiorna lo stato in un ambiente software 3D [37]. Questo consente applicazioni piuttosto interessanti:

- simulazione di processo: si può provare virtualmente un nuovo metodo di assemblaggio o un diverso layout, verificando con il digital twin i tempi ciclo, eventuali interferenze o colli di bottiglia, prima di implementarla realmente;
- ottimizzazione: tramite algoritmi, il gemello digitale può analizzare le variazioni dei parametri per trovarne le combinazioni migliori che poi verranno applicate al sistema reale;
- manutenzione proattiva: il twin consente di calcolare una stima della vita residua di componenti critici simulando fattori di stress e usura accumulati, basandosi sui reali dati operativi [38].

Siemens, tra i primi a lavorare con digital twin, lo utilizza nel suo stabilimento di Amberg: ogni nuova linea o modifica viene prima testata sul gemello digitale della linea, permettendo di ridurre i tempi di avvio produzione e gli errori di progettazione [39]. Nell'automotive, tutte le grandi case come BMW, Tesla o Toyota iniziano ad utilizzare digital twin nei propri impianti produttivi. Questi gli permettono di mandare avanti produzione e lancio di nuovi modelli in maniera parallela: ad esempio BMW ha creato un modello virtuale integrale dello stabilimento di Regensburg, su cui ha simulato l'introduzione di nuovi robot e AGV per la messa in produzione di un nuovo modello, ottimizzando i flussi prima però di implementare effettivamente la riconversione dell'impianto stesso [40]. Un altro campo è il training degli operatori; infatti, con digital twin e tecnologie VR/AR (virtual reality/augmented reality), si può imparare a gestire una cella robotica in maniera virtuale, imparando procedure di cambio utensile o risoluzione guasti, senza rischi per la produzione reale e personale dell'operatore. Infine, il digital twin è essenziale per realizzare l'integrazione con il concetto di metaverso industriale di cui parla il World Economic Forum [41] dove l'idea è quella di creare ambienti virtuali condivisi dove progettisti, operatori e manager possono collaborare in maniera real-time sul modello digitale della fabbrica, prendendo decisioni informate e ponderare grazie ai dati condivisi e consistenti.

Cloud & Edge Computing: l'architettura computazionale è quella parte del sistema fondamentale e propedeutica per il sostegno di tutto quanto appena vista precedentemente. In particolare, l'insieme di cloud computing ed edge computing sta ridefinendo il modo in cui vengono gestiti i

dati e le applicazioni nell’industria [42]. Il cloud computing consente potenza di calcolo e storage virtualmente illimitati su server per analisi di big data, allenamento di modelli di AI, ecc. Ad esempio, i dati storici di anni di produzione, raccolti magari tramite sensoristica IoT industriale, possono essere caricati su cloud e analizzati con algoritmi appositi, per trovare correlazioni particolari o addestrare una rete neurale di manutenzione predittiva. Il cloud permette inoltre il modello “as-a-Service”: per la robotica, infatti, significa che alcune funzioni possono essere fornite on-demand via cloud, come nel caso della già nominata Robotics-as-a-Service (RaaS) [7], dove le aziende pagano una specie di noleggio per utilizzare tecnologie robots di diverso tipo, gestite dal fornitore tramite le piattaforme cloud.

Nonostante questo, non sarebbe possibile delegare tutto al cloud, soprattutto in fabbrica dove la latenza deve essere molto ridotta (ad esempio, per un controllo robot in tempo reale), l'affidabilità deve essere massima (la produzione non può fermarsi se manca connessione internet) e sicurezza (dati sensibili); quindi, entra in gioco l'edge computing, ovvero il delegare alcune capacità computazionali alle macchine stesse. Un dispositivo edge esegue localmente l'elaborazione di dati grezzi dei sensori, applica in loco un modello AI per il controllo in tempo reale di un robot e poi manda solo le informazioni rilevanti e maggiormente aggregate ed elaborate al cloud. Questa sinergica architettura ibrida cloud-edge è considerata un tema centrale di oggi: il cloud viene usato per ciò che richiede potenza e aggregazione mentre l'edge per reattività e continuità operativa. Questa idea di sistema torna utile quando si guarda al future delle fabbriche, ovvero delle Smart Factory; infatti, si avranno tecnologie molto sviluppate e capaci di task computazionalmente complessi a livello locale, ma per assicurare una produzione indipendente a livello integrato e coerente con principi come quelli della Dark Factory, tutte queste tecnologie dovranno essere anche collegate tra loro. IFR metti in evidenza come cloud e 5G stiano abilitando nuovi modelli di business in robotica, inclusa la collaborazione cloud-robot e servizi in tempo reale a basso costo [7]. In sostanza, il cloud-edge è l’infrastruttura che permette scalabilità e intelligenza in maniera distribuita: si può intendere la fabbrica non più come un’isola, bensì come parte di un ecosistema connesso in cui le risorse che computano dati vengono allocate in modo flessibile dove possono essere più strategiche (localmente o da remoto) per ottimizzare le prestazioni e i costi. Per le aziende manifatturiere questo significa poter godere di analisi di alto livello e backup sul cloud senza dover rinunciare alla comodità del controllo locale.

In conclusione, le tecnologie abilitanti, cobot, AMR, umanoidi, AI, IIoT, digital twin, cloud/edge lavorano insieme come componenti di un sistema complesso e integrato, il tutto in ottica Smart

Factory. È quindi dall'insieme combinato di tutte queste componenti che si ottiene il pieno potenziale della robotica avanzata nel manifatturiero: linee produttive flessibili, efficienti, capaci di auto-migliorarsi e di cooperare con l'organico aziendale in diverse modalità, in modo da rispondere rapidamente alle esigenze del mercato.

2.4 Benchmark internazionale

Per capire meglio quali siano benefici e modalità di adozione della robotica avanzata nell'industria, ne vengono presentati alcuni esempi di utilizzo di livello internazionale ed eccellenza. Queste imprese pioniere servono da benchmark di riferimento.

Caso Siemens

La sua lead factory di Bad Neustadt, in Germania, rappresenta un caso di punta di integrazione tra robotica flessibile, digital twin e gestione intelligente della produzione.

Nell'impianto di Bad Neustadt, Siemens produce motori elettrici e componenti per azionamenti, tra cui modelli destinati anche a robot industriali KUKA. L'approccio produttivo si caratterizza per l'elevato livello di automazione integrata, che non compromette la flessibilità necessaria per gestire una varietà di prodotti e varianti. Tra gli elementi più innovativi c'è una cella robotica collaborativa ad-hoc per l'assemblaggio degli statori: si tratta di una fase operativa semplice ma ripetitiva e suscettibile ad affaticamento e micro-errori umani, in cui si è voluto intervenire con una soluzione robotizzata ad hoc [43]. Siemens ha sviluppato una postazione in cui un robot collaborativo KUKA lavora in stretta sinergia con l'addetto umano. La configurazione permette l'interazione diretta. Il robot è montato su una struttura che scorre lungo una rotaia così da poter operare in più stazioni. I benefici sono molti in termini di produttività e di qualità. Il sistema robotico è integrato nell'infrastruttura digitale Siemens, controllato tramite PLC, connesso all'MRP e dotato di digital twin. Un ulteriore elemento distintivo del sito è l'impiego di AGV/AMR per la logistica interna: orchestrati in tempo reale tramite il sistema centrale (TIA Portal) affinché ne risulti una logica just-in-time.

Caso FANUC

La sede produttiva di FANUC ai piedi del Monte Fuji in Giappone è un modello consolidato di fabbrica lights-out partendo già nel 2001 a costruire robot con altri robot per un totale di 50 robot prodotti al giorno, senza necessità di essere presidiati di continuo fino a 30 gg continuativi senza interventi umani [44]. Il funzionamento di questa fabbrica è reso possibile grazie a linee produttive progettate in maniera greenfield per l'automazione totale. All'interno, robot FANUC sviluppati

ad-hoc per questo lavoro prelevano i componenti, li assemblano, avvitano, eseguono test funzionali e confezionano i prodotti finiti; il tutto orchestrato da una piattaforma centralizzata con sensori che tracciano real time ogni fase del processo. I vantaggi derivanti da questo approccio sono considerevoli e legati alla riduzione dei costi operativi (-20% sui costi di manodopera e +30% produttività) [34] e un livello qualitativo costante, grazie alla ripetibilità assoluta delle operazioni.

Caso BMW

Lo stabilimento BMW Group di Spartanburg (USA) ha per la prima volta impiegato un robot umanoide nella produzione di serie: si tratta di Figure 02 di Figure AI, testato direttamente nell'assemblaggio della carrozzeria dove per alcune settimane ha inserito lamierati in specifici alloggiamenti all'interno della carrozzeria con grande destrezza. Dal punto di vista ergonomico la finalità era sollevare l'operatore da un'attività usurante mentre sul piano tecnico si trattava di mettere all'opera le sue due gambe, mani con 16 gradi di libertà ciascuna, sensori visivi, microfoni, e una batteria potenziata rispetto alle versioni precedenti. Questo progetto ricade all'interno della visione BMW iFACTORY, che supporta efficienza, digitalizzazione e sostenibilità, visti come i pilastri della produzione del futuro. L'importanza sistematica dell'esperimento è significativa: BMW sta raccogliendo conoscenze sui requisiti per l'integrazione di robot umanoidi in sistemi produttivi esistenti, in particolare su come comunicano con la linea e lavorano in sinergia con le infrastrutture automatizzate presenti [45], [46].

In conclusione, i benchmark internazionali mostrano diversi approcci all'eccellenza, tutti diversi ma accomunati da una visione strategica chiara sul ruolo della robotica: viene considerata non un costo ma un investimento per ottenere vantaggi competitivi sostanziali.

2.5 Contesto Italiano e Regioni Industriali

Il settore manifatturiero italiano è fortemente concentrato nelle regioni del Nord, in particolare Piemonte, Lombardia ed Emilia-Romagna. Queste tre regioni sono il motore industriale del Paese e contribuiscono in maniera significativa al PIL e all'export nazionali [47]. Insieme compongono più del 50% delle esportazioni italiane di beni, con la Lombardia da sola al 26,1% del totale nel 2023 [47]. L'Emilia-Romagna e il Veneto seguono con circa il 13-14% ciascuno, e il Piemonte si conferma al quarto posto come regione esportatrice con 10,4 punti percentuali (in crescita rispetto al 9,4% dell'anno prima) [48]. In termini assoluti, nel 2023 la Lombardia ha esportato per un valore record di 163,6 miliardi di euro, l'Emilia-Romagna 85,1 miliardi e il Piemonte 64,9 miliardi, tutte in incremento nonostante il rallentamento nazionale [48], [49]. Questi dati spiegano la

concentrazione geografica dell’industria italiana e come questi territori siano molto rivolti anche verso uno scenario internazionale.

Struttura settoriale e distretti industriali

Ciascuna delle tre regioni mostra un tessuto produttivo diversificato con specializzazioni distinctive e popolato principalmente da PMI accanto ad alcune grandi imprese leader. In Piemonte, il settore automotive è storicamente quello dominante: la zona di Torino ospita Stellantis e un indotto di circa 1.300 aziende componentistiche, rappresentando il core nazionale dell’auto [50]. Il comparto dei mezzi di trasporto (autoveicoli, veicoli industriali e aerospazio) contribuisce, infatti, da solo, al 25% dell’export del Piemonte [48], grazie alla presenza sia di OEM automobilistici sia di attori aerospaziali di rilievo (Leonardo, Thales Alenia Space, Avio Aero).

Piemonte

Il Piemonte può anche andare fiero dell’importante distretto aerospaziale che conta circa 150 imprese e 35.000 addetti [51], che offre una filiera completa e competenze avanzate e sta sviluppando tecnologie molto innovative come robotica spaziale avanzata e manifattura additiva [51]. Se poi si guarda ad altre specializzazioni piemontesi si può parlare di meccanica (17,6% dell’export regionale [48]), di agroalimentare e bevande (12,8%) e di tessile-moda, grazie a distretti storici come quello della lana di Biella e quello di rubinetti e valvole della zona di Novara. Anche il settore orafo di Valenza e il distretto del riso nel Vercellese sono eccellenze regionali. La maggior parte delle imprese piemontesi sono PMI, ma la presenza di grandi player e centri di R&S (Politecnico di Torino, IIT, etc.) ha permesso lo sviluppo di un ecosistema di innovazione di un certo calibro. In particolare, robotica e meccatronica sono già all’interno della cultura industriale piemontese: la leadership regionale in questi campi ha stimolato efficienza e automazione in tutta la filiera automotive [50]. Questo ha creato sinergie tra le grandi imprese e le aziende che ne compongono la catena di fornitura specializzata, andando a consolidare molti distretti ad alta tecnologia.

Lombardia

La Lombardia, regione italiana economicamente più grande, in cui la struttura industriale è ampiamente diversificata. La regione eccelle nella meccanica strumentale e nei macchinari industriali, supportata da distretti come quello della metallurgia e siderurgia a Brescia e Bergamo, e dell’oleodinamica nel Cremonese. Le esportazioni del manifatturiero lombardo nel 2023 sono rimaste stabili (+0,8%), raggiungendo un massimo storico, spinto però da particolari sezioni in

crescita del settore: i mezzi di trasporto (+13,4%), gli alimentari (+7,1%) e i macchinari (+6,4%) sono stati i settori che hanno maggiormente sostenuto le vendite all'estero [49]. Questo indica una base industriale eterogenea, in cui a settori tradizionali in lento rallentamento (es. metallurgia e chimica in calo nel 2023 [49]) si affiancano settori in espansione legati tanto alla meccanica quanto all'agroalimentare trasformato. Inoltre, in Lombardia è possibile trovare poli chimico-farmaceutici conosciuti a livello mondiale, un robusto settore moda-design (industria tessile/abbigliamento a Como, Milano e lungo l'asse della Brianza) e importanti aggregati nel settore della gomma-plastica (Varese) e mobilio (distretto del mobile della Brianza). La distribuzione di distretti industriali è capillare: dal mobile d'arredo, al tessile serico comasco, alle calzature nel Vigevanese, fino ad arrivare alla moda di lusso del milanese. Milano ricopre anche il ruolo di hub di servizi di alto livello e sede di quartier generali, integrando manifattura e terziario avanzato. La Lombardia vanta un numero relativamente più alto di imprese medio-grandi rispetto ad altre regioni italiane, incluse multinazionali come Pirelli, Brembo, Tenaris, ABB Italia e molte altre leader di nicchia. Il contributo che apportano queste aziende si misura anche in termini di investimenti consistenti in R&S e ad una elevata tendenza all'export (oltre 163 Mld € annui [49]). Anche l'aerospace ha una presenza, con siti produttivi di Leonardo e altre imprese componentiste, anche se meno concentrato rispetto al Piemonte, come visto in precedenza.

Emilia-Romagna

L'Emilia-Romagna si distingue per un modello di sviluppo industriale basato su zone altamente specializzate e imprese di medie dimensioni fortemente internazionalizzate. La regione ha esportato per 85,1 miliardi € nel 2023 (+1,1%), seconda in Italia e prima per export pro-capite (19.200 € per abitante) [47], [52]. Un elemento particolarmente caratterizzante è la presenza della Motor Valley, con epicentri Modena, Bologna e Ferrara, dove sono locati produttori di veicoli di alta gamma e da competizione (Ferrari, Lamborghini, Maserati, Ducati, Pagani, Dallara) assieme a una filiera di fornitura di componenti di motoristica eccellente [53]. Questo aggregato regionale dell'automotive, pur rappresentando volumi produttivi limitati rispetto al Piemonte, complice il tipo di posizionamento in questo mercato, crea un forte sviluppo tecnologico e competenze avanzate nella meccanica di precisione e nei materiali compositi. Un'altra punta di diamante è la Packaging Valley con epicentro a Bologna e circa 200 aziende leader mondiali nelle macchine automatiche per il packaging, rappresentando oltre il 60% del fatturato nazionale di questo settore [54]. IMA, Marchesini, Tetra Pak, Coesia sono esempio di quei gruppi che fanno dell'Emilia un riferimento globale per l'automazione nel confezionamento alimentare, farmaceutico e industriale.

Il comparto meccatronica e automazione è dunque trasversale e sostiene anche altri settori regionali (ceramico, agroalimentare, biomedicale). L'Emilia-Romagna è conosciuta, infatti, anche per il distretto delle piastrelle ceramiche della zona di Sassuolo (leader europeo, 90% dell'export italiano di ceramica [53]), per il biomedicale di Mirandola e per produzioni agroalimentari importanti (la Food Valley della zona di Parma con impiantistica alimentare e prodotti DOP/IGP). La composizione imprenditoriale emiliana è principalmente caratterizzata da PMI e imprese familiari medio-grandi, solitamente organizzate in distretti e filiere integrate. Questa organizzazione permette resilienza e capacità di specializzazione flessibile, elevata cooperazione industriale e consorzi di esportazione. Con una disoccupazione tra le più basse d'Italia (circa 5% [55]) e di salari industriali competitivi, il sistema produttivo emiliano investe molto in qualità e innovazione per mantenere vantaggi competitivi. Non a caso, l'Emilia-Romagna registra il primato italiano per spesa in R&S sul PIL regionale e per numero di start-up innovative per abitante, segno di un contesto tecnologico vivace e di forte trasferimento di conoscenza dalle università (Politecnico di Milano sede di Piacenza, Università di Bologna, ecc.) al tessuto imprenditoriale.

Adozione di robotica avanzata

Le regioni del Nord Italia dimostrano livelli di adozione delle tecnologie 4.0, inclusa la robotica avanzata, decisamente maggiori rispetto alla media nazionale, grazie alla concentrazione di imprese manifatturiere e alla presenza di infrastrutture per l'innovazione. In generale l'Italia è il secondo mercato europeo per robot industriali installati, dopo la Germania, con un rapporto robot-operatore in crescita (circa 224 robot ogni 10.000 addetti manifatturieri solo nel 2021 secondo IFR [9]). Questa diffusione però non è così omogenea: Lombardia ed Emilia-Romagna sono ai primi posti nel Paese per automazione industriale, quando invece regioni meno industrializzate mostrano ritardi. La Lombardia risulta la regione con il maggior numero assoluto di robot industriali operativi, grazie al peso di settori automobilistico, metalmeccanico e chimico che tradizionalmente impiegano automazione. Anche l'Emilia-Romagna evidenzia un'alta penetrazione: molti impianti produttivi (dalle linee automotive alle macchine automatiche) integrano robotica di ultima generazione, spesso co-sviluppata con fornitori locali. Il Piemonte, anche se un poco sotto per numero totale, presenta picchi di eccellenza in settori ad alta automazione. Alcune imprese del Nord Italia, soprattutto se di grande dimensione, iniziano già ad integrare soluzioni robotiche avanzate nei processi, ottenendo da queste scelte strategiche benefici in produttività e qualità. Questo divario dimensionale spiega come le grandi imprese, disponendo di maggiori risorse finanziarie e competenze interne, siano più indotte ad investire in robotica, arrivando persino a

formare o assumere specialisti dedicati. Al contrario, molte PMI, pur interessate, ritardano in questa direzione, frenate da costi e conoscenze limitate, ma mantengono un forte interesse nei confronti dell'adozione futura di robot [56].

Readiness tecnologica

La Readiness tecnologica delle tre regioni, intesa come preparazione all'adozione di tecnologie avanzate, è supportata da robusti ecosistemi dell'innovazione. In ogni regione operano centri di competenza industria 4.0 promossi dal MISE: a Milano il centro MADE, a Torino il CIM4.0, a Bologna Bi-Rex, sono focalizzati sul trasferimento di competenze digitali e sull'integrazione di robotica collaborativa, big data e AI nelle PMI locali, aiutandole nella trasformazione. Allo stesso modo, Digital Innovation Hub regionali e cluster tecnologici hanno un ruolo chiave. In Piemonte, il polo di innovazione Mesap riunisce imprese e centri di ricerca del meccatronico e dell'automotive, portando avanti progetti di robotica applicata in fabbrica. In Lombardia, il cluster AFIL (Associazione Fabbrica Intelligente Lombardia) promuove roadmap tecnologiche e casi pilota di robotica avanzata nelle imprese manifatturiere. In Emilia-Romagna, la rete Clust-ER include il cluster Mech (Meccatronica e Motoristica) e Innovate che aiutano l'implementazione di soluzioni 4.0 nei settori principali italiani. Tali iniziative, in sinergia con i finanziamenti nazionali, hanno innalzato la maturità digitale delle imprese locali: si registra un incremento di investimenti in automazione, IIoT e analytics, oltre ad una crescita di competenze digitali nell'organico delle aziende. In Lombardia, iniziative come il Polo lombardo della Manifattura Digitale hanno contribuito a diffondere casi di fabbrica intelligente (smart factory) anche tra medie aziende tradizionali (metalmeccanica, chimica). Infine, va aggiunto e preso in considerazione il ruolo delle università e dei centri di ricerca locali (es. Politecnico di Milano e di Torino, Università di Bologna) nel formare ingegneri e tecnici e nello sviluppare startup in ambito robotica e automazione.

Per concludere, Piemonte, Lombardia ed Emilia-Romagna presentano un contesto industriale avanzato, con specializzazioni settoriali distinte ma una comune propensione all'innovazione. La robotica avanzata è già realtà in molte grandi fabbriche di queste regioni, mentre il tessuto delle PMI sta rapidamente incrementando la propria readiness tecnologica grazie a politiche mirate, infrastrutture di supporto e una crescente consapevolezza dei benefici (efficientamento, qualità, sicurezza) associati all'automazione. Queste condizioni mettono le basi per un'ulteriore diffusione di robotica avanzata, inclusi robot collaborativi e potenzialmente robot umanoidi, nei prossimi

anni, coerentemente con le traiettorie di sviluppo della Fabbrica Intelligente delineate a livello nazionale [57], [58].

3. Pain Points del Manifatturiero e Gap di Automazione

3.1 Criticità globali del settore

Il settore manifatturiero internazionale è ultimamente caratterizzato da una serie di pain points, alcuni strutturali ovvero problematiche frequenti mentre altri più legati al momento storico; infatti, entrambi riducono la produttività, la qualità e la sicurezza operativa. Si tenterà di analizzare le principali criticità, partendo dalla carenza di manodopera fino ai limiti dell'automazione tradizionale, mettendo in evidenza il potenziale impatto su efficienza, qualità, sicurezza e costi.

Carenza di manodopera qualificata e ricambio generazionale

All'inizio della lista c'è la carenza di manodopera qualificata, criticità diffusa aggravata dall'invecchiamento della forza lavoro e dal basso ricambio generazionale. In molti tra i Paesi economicamente sviluppati, infatti, la popolazione in età lavorativa è in diminuzione, creando cali dell'offerta di lavoro difficili da sostenere da parte delle aziende, soprattutto per profili tecnico e specializzati. Ad esempio, il settore della cantieristica navale in Corea del Sud è segnato da una carenza strutturale di ruoli come saldatori e operai; infatti, si stima un gap medio di oltre 12.000 addetti ogni anno, ovvero di 130.000 unità cumulativamente entro il 2027 [59]. Più in generale, la scarsità di personale qualificato e forza lavoro sempre più vecchia sono sempre più un vincolo per la capacità produttiva dell'industria. In recenti analisi si spiega come molte economie avanzate registrino "massicce carenze di manodopera" nel manifatturiero e nella logistica arrivando ad aspettarsi che il fenomeno continui ad aumentare con un ulteriore invecchiamento medio della popolazione [12]. Oltretutto, un pronostico della banca UBS prevede la diffusione di 2 milioni di umanoidi globalmente per il prossimo decennio e fino a 300 milioni entro il 2050, proprio per poter soddisfare la domanda di lavoro scoperta in quelle che sono società con età media sempre maggiore [60]. La mancanza di personale significa crescita rallentata e i principali elementi di questo scenario sono turni scoperti, che portano a costosi straordinari e rallentamenti nella produzione. Inoltre, le imprese sono in difficoltà nell'attrarre giovani per quelle che sono le mansioni più tipiche del manifatturiero, perché percepite pesanti e poco qualificanti, portando ad un'elevata rotazione nei reparti di produzione. Questo fenomeno comporta costi addizionali di formazione e fughe di know-how. In generale, la mancanza di manodopera qualificata crea

potenziali divari produttivi e non aiuta le aziende ad essere operative in maniera continua e competitive a livello di innovazione.

Compiti pericolosi e rischi per la sicurezza sul lavoro

Molti processi manifatturieri sono caratterizzati da attività tipicamente pericolose per l’operatore come, ad esempio, ambienti rumorosi, temperature estreme, sostanze tossiche o macchinari in movimento. Queste situazioni espongono potenzialmente gli operatori a infortuni, il che i traduce in costi dal punto di vista umano ma anche aziendale per via di interruzioni della produzione, costi assicurativi e obblighi normativi rigidi. Incidenti e malattie legate alla propria mansione sono quindi un problema serio nell’industria: un articolo del *Sole 24 Ore* spiega a proposito che i robot avanzati e l’AI potrebbero migliorare l’aspetto della sicurezza per circa 3 milioni di operatori industriali, il che rende l’idea della scala della dimensione della questione attuale [61]. Nel siderurgico, chimico o la cantieristica navale, alcuni compiti manuali risultano piuttosto rischiosi (es. saldatura in spazi ristretti, movimentazione di carichi molto pesanti, materiali taglienti). Oltre al pericolo immediato, come un incidente, va considerato anche quello a lungo termine per la salute, come, ad esempio, esalazioni tossiche da verniciatura o radiazioni di certi processi. Queste condizioni di lavoro mettono a rischio i dipendenti e sono strettamente collegate a voci di costo (giornate di malattia, indennizzi, calo di motivazione). Riuscire a diminuire l’esposizione umana a compiti pericolosi è quindi una questione ad alta priorità, sia etica che economica. Un caso emblematico proviene dalla cantieristica in cui HD Hyundai ha sviluppato un programma di robot saldatori umanoidi da applicare nei propri cantieri, con l’obiettivo di rimuovere dalla competenza umana i compiti più pericolosi e allo stesso tempo ridurre la necessità di saldatori qualificati, vista la loro rarità [62]. L’azienda prevede che questi robot, oltre ad aumentare la produttività, ridurranno anche il carico di lavoro dei saldatori e aumenteranno in maniera drastica la sicurezza in cantiere [59]. Questo esempio è perfetto per contestualizzare la pericolosità di alcuni compiti e di come questa sia quindi un pain point cruciale.

Attività ripetitive, affaticamento ed errori di qualità

Un altro pain point frequente è la ripetitività di certe attività manuali a scarso valore aggiunto lungo il processo produttivo. Ne sono da esempio l’avvitamento di sequenze di viti, l’inserimento di componenti su un nastro, controlli visivi in serie, l’alimentazione di certi macchinari; queste attività risultano monotone e usuranti per gli operatori. Le appena citate non solo riducono il coinvolgimento a livello lavorativo ma causano anche affaticamento fisico e mentale causato dalla ripetitività, che poi porta ad errori, riduzione della precisione e scarti. La bassa variabilità del task

ripetitivo influenza molto la qualità della produzione e della produttività, dovendo il ritmo rimanere sostenibile per l'operatore. Inoltre, operazioni come queste possono portare a disturbi fisici (per via di movimenti ripetitivi e/o posture fisse), incrementando il numero delle assenze per malattia e turnover. In generale, il lavoro manuale ripetitivo è composto da quell'insieme di compiti "duri, sporchi e noiosi" che l'automazione tradizionale non è riuscita ad eliminare completamente. Nell'automotive, per esempio, nelle fasi finali di assemblaggio dell'abitacolo ci permangono mansioni svolte a mano ergonomicamente rischiose per gli umani: questo non solo affatica i lavoratori, ma può tradursi in errori di qualità nell'installazione di componenti. La ripetitività è quindi un pain point con due aspetti: degrado delle condizioni di lavoro e degli stessi output prodotti.

Flessibilità produttiva limitata e automazione rigida

Considerando il mercato in rapido cambiamento e con direzione lotti più piccoli, mass-customization e cicli di vita del prodotto più brevi, la flessibilità produttiva diventa un punto strategico. Ciò nonostante, molti impianti manifatturieri tradizionali faticano nell'adattarsi velocemente ai cambi in termini di prodotto e/o volume richiesti dal mercato perché basati su un'automazione cucita appositamente su quel portafoglio prodotto e quindi rigida. I sistemi di automazione più tradizionali sono certamente molto efficienti se si parla di produzioni standardizzate e con alti volumi, ma poco adatti a scenari dove invece c'è alta variabilità della domanda. Dover ricalibrare o riconfigurare una linea automatizzata potrebbe necessitare di tempi e costi cospicui, portando alla riprogrammazione delle linee ad essere un evento piuttosto raro. Questo porta a far sì che molte operazioni specializzate o in piccole serie vengano ancora portate avanti in maniera manuale, creando colli di bottiglia nel flusso produttivo. È quindi così che la scarsa flessibilità risulta uno dei pain point chiave per questo settore. Si può prendere come esempio il settore aerospaziale, in particolare l'assemblaggio di satelliti e/o velivoli. Proprio il fatto che la produzione sia in poche unità richiede elevata adattabilità della produzione, e molte attività rimangono intenzionalmente artigianali perché i robot tradizionali non sono capaci di gestire contesti così destrutturati. In generale, esiste una lunga lista di operazioni che non è ancora possibile automatizzare proprio perché richiedono flessibilità, intelligenza e destrezza ad un livello che le macchine di oggi non riescono a supportare [63]. Questa incapacità di automatizzare compiti complessi o variabili riduce l'efficienza: significa dover affidare all'uomo tutte le attività che non rientrano tra quelle standardizzate, portando a costi più alti e rischio di commettere errori. Considerando l'altra faccia della stessa medaglia, la bassa flessibilità non permette inoltre di

sfruttare completamente opportunità di mercato come possono essere la personalizzazione last-minute, la rapida riconfigurazione della produzione in caso di eventi esogeni.

Problematiche ergonomiche e infortuni da sforzo

Come ultimo tra i principali pain points, presente in tutto il manufacturing, c'è trova la questione dell'ergonomia del lavoro. Molte attività, se pur non siano catalogate pericolose in senso tradizionale, comportano sforzi fisici e posture scorrette che, ripetuti nel tempo, possono portare infortuni e problemi fisici di varia natura con conseguenze dirette sulla produttività. Questi microtraumi, nel tempo, possono portare a malattie legate alla professione, tipiche di questo settore, che ogni anno portano a perdite di milioni di ore lavorative. Guardando i dati OSHA, circa il 30% degli infortuni sul lavoro, causanti assenza prolungata, negli USA, sono connessi a disturbi fisici da sforzi ripetitivi o postura [64]. Oltre al danno umano, è una questione anche di costi assicurativi e di sostituzione del personale. Anche se non si arriva a dichiarare l'infortunio, le condizioni ergonomiche errate diminuiscono l'efficienza operativa del personale: un operatore stanco o dolorante sarà carente in precisione e velocità.

3.2 Pain Points specifici per sottosettore

Il fatto che i sistemi produttivi siano caratterizzati da grande eterogeneità comporta che i pain point abbiano configurazioni diverse in base a volume, a quanto varia il mix produttivo, alla complessità dei processi e ai vincoli istituzionali. Fare un'analisi per sottosettore permette di distinguere meglio i fattori strutturali (scala, ritmo d'innovazione, intensità capitale) da fattori circostanziali (regolazione, rischi di fornitura). In generale, ciò che è più frequente si raggruppa in efficienza, qualità, flessibilità, manutenzione, competenze e logistica, con pesi relativi differenti. Questa mappatura permette di dare inizio alla valutazione, con criteri confrontabili, di quando e dove l'automazione avanzata, inclusi cobot e, in prospettiva, humanoidi, può portare benefici quantificabili.

Automotive

Nell'automotive la produzione di massa è vincolata da forti requisiti di qualità e flessibilità. Un pain point centrale è il controllo qualità lungo la linea: molte operazioni dipendono da ispezioni visive per garantire la conformità del prodotto [65]. Da sempre state affidate ad operatori umani, questo tipo di ispezioni manuali sono spesso caratterizzate da errori e fatica. Con l'arrivo di sistemi di visione artificiale si è pensato di automatizzare questi controlli, ma comportando nuove sfide: l'affidabilità delle ispezioni automatizzate cambia molto in base alle condizioni ambientali come

illuminazione e qualità delle immagini, portando a setup costosi e ogni tanto andando a rallentare il ciclo produttivo.

Un altro pain point sicuramente è la flessibilità produttiva essendo le moderne linee automotive sfruttate per la produzione di più modelli di veicoli sullo stesso impianto, aumentando complessità e variabilità da gestire [65]. Questo comporta per forza sistemi agili e riconfigurabili, altro a controlli qualità adattativi che siano capaci di riconoscere componenti differenti senza scartare erroneamente qualche unità. Infine, l'efficienza e i tempi ciclo sono vitali: fermi non pianificati o colli di bottiglia hanno costi elevatissimi in un contesto just-in-time. Non è casuale che l'automotive sia uno dei settori più automatizzati: nel 2024 circa un terzo di tutti i nuovi robot industriali installati in Europa era destinato a impianti automotive [7], evidenza del fatto che i costruttori stiano investendo in maniera massiccia nell'automazione per mitigare questi pain point potenziando produttività, qualità e continuità operativa.

Aerospazio

Nell'aerospaziale si parla di problemi distinti legati alla produzione ai piccoli lotti, all'uso di materiali avanzati e all'assoluta necessità di qualità. Un problema fondamentale è garantire la qualità nei processi complessi come la fabbricazione di strutture in materiale composito. In questi casi la tolleranza è molto ristretta e controlli onerosi possono rallentare la produzione: emblematico il caso Boeing 787, dove la scoperta di difetti millimetrici (intorno ai 0,005 pollici per quanto riguarda gli stabilizzatori di coda) ha costretto l'azienda a rallentare le consegne per prima svolgere ispezioni approfondite. Boeing ha dichiarato di prendersi “il tempo necessario per ispezionare a fondo i 787 completati” in modo da assicurare che ogni velivolo rispetti le specifiche prima della consegna, andando però a impattare i tempi di produzione nel breve termine [66]. Questo caso mette in luce come anche solo una minima non-conformità in produzione comporta costosi ritardi, visti i rigidi standard di sicurezza.

Un secondo pain point riguarda l'inefficienza di certi processi manuali tradizionali nelle produzioni più avanzate. Ad esempio, lo shimming (riempimento dei giochi tra componenti) nella fusoliera del caccia F-35 è sempre stata svolta in maniera artigianale, portando a tempi ciclo elevatissimi e a sprechi: il metodo manuale necessitava di più di 60 ore di lavoro per velivolo, con largo utilizzo di manodopera, scarti di materiale e problemi di qualità che rischiavano di non far rispettare le scadenze di produzione [67]. La causa risiede nelle tolleranze di montaggio difficili da compensare senza un sistema automatizzato di applicazione degli spessori. Per affrontare queste sfide si sta iniziando ad implementare nuove tecnologie e metodologie. Per quanto riguarda

l'automatizzare in maniera flessibile, progetti europei come OPTICOMS (Clean Sky 2) propongono di rivedere design e processi per permettere la produzione automatizzata e conveniente di componenti in composito [68]. Inoltre, si fanno esperimenti su celle robotizzate (inclusi robot collaborativi) per operazioni finora manuali di assemblaggio e finitura, con scopo principale la riduzione dei tempi e l'uniformare la qualità.

Chimico & Farmaceutico

Nel settore chimico-farmaceutico la massima priorità è rivolta a qualità e conformità ai regolamenti, ma questa introduce naturalmente vari pain point operativi. Uno di questi è il bisogno di zero difetti in produzione e confezionamento, specialmente per i farmaci: un singolo errore può avere enormi conseguenze. Ad esempio, nel packaging farmaceutico regna il concetto di tolleranza zero per etichette errate: un produttore di etichette per medicinali ha dovuto affrontare richieste di ispezione al 100% dopo che quella di una sola confezione era stata sbagliata, potendo mettere a rischio la sicurezza del paziente e innescando costosi richiami. È evidente la limitazione dei metodi tradizionali: gli operatori non riuscivano a garantire il livello di accuratezza richiesto a certe velocità della linea. La causa sta nei limiti fisici (affaticamento, attenzione) e nella complessità delle etichette moderne (più lingue, codici a barre, info critiche). Per soddisfare le norme (FDA, EMA) e assicurare che zero etichette difettose arrivino al mercato, si stanno implementando sistemi di visione e AI capaci di rilevare il 99,8% dei difetti in tempo reale, con documentazione automatica per verifiche regolatorie [69].

Un secondo pain point è l'efficienza dei processi di pulizia e sterilizzazione. La produzione farmaceutica deve svolgere spesso cicli di Cleaning/Sterilization-In-Place (CIP/SIP) degli impianti per evitare contaminazioni tra i diversi lotto (particolarmente nei prodotti sterili). Questi cicli significano fermi produzione significativi e grande consumo di risorse: fino al 30% dell'utilizzo d'acqua, di vapore e chimici di uno stabilimento è utilizzato da questi processi. Solitamente il monitoraggio della fine del ciclo di lavaggio e risciacquo è manuale (gli operatori leggono strumenti e comunicano quando ripartire), portando a ritardi nei riavvii e spreco di dati preziosi. Uno stabilimento tipico può spendere migliaia di euro l'ora a causa di tempi morti durante i cambi di lotto e investire 20-40 mila € annui in manodopera solo per controlli CIP manuali. Fortunatamente, soluzioni di automazione intelligente stanno nascendo: sensori smart e edge computing possono rilevare automaticamente la fine della sanificazione, riducendo i tempi morti e tagliando del 20-35% i consumi di acqua e utility [70].

Un ulteriore pain point riguarda la tracciabilità globale dei prodotti imposta per legge in molti Paesi per ridurre il numero di prodotti contraffatti e garantire la sicurezza della supply chain farmaceutica. Implementare sistemi di serializzazione univoca su scala globale diventa estremamente complesso se ogni nazione adotta standard e database differenti, creando una situazione frammentata. Le aziende si trovano a dover gestire regolamentazioni eterogenee in ciascun mercato (USA DSCSA, EU FMD, ecc.) e a integrare nuove infrastrutture IT: formati di dati incompatibili e software diversi tra Paesi riducono la possibilità di un sistema unificato. Questo significa investire nell'aggiornamento degli impianti (stampanti e verificatori di codici) e piattaforme software capaci di dialogare con più enti di regolamentazione. La complessità IT e di processo, più i costi, è un pain point importante, e spesso le soluzioni sono ad-hoc per Paese, aumentando la complessità operativa [71]. Infine, c'è il tema delle competenze: la gestione di impianti chimico-farmaceutici di alto livello necessita di personale altamente qualificato, la cui scarsità in molti impianti invecchiati si fa sentire. L'uscita per pensionamento di esperti e la difficoltà nel trovare nuove figure tecniche crea pressioni ulteriori: in un'area di margini ridotti, miglioramento produttività e riduzione sprechi attraverso l'automazione diventa fondamentale [70].

Elettronica & Macchine Utensili

L'elettronico e il comparto delle macchine utensili possiedono sfide simili legate all'alta precisione, alla rapidità nell'innovare e alla complessità tecnica dei processi. Un primo pain point riguarda l'affidabilità degli impianti: in elettronica, infatti, un singolo guasto inatteso può costare migliaia di euro e ritardare intere forniture. Le fabbriche elettroniche (dai semiconduttori all'assemblaggio SMT) operano con margini d'errore minimi: ogni saldatura o componente deve rispettare standard rigorosi, e anche un lieve sfasamento o una fluttuazione termica può mandare fuori specifica un lotto di produzione. Le conseguenze sono scarti costosi o reworking estensivi, che impattano negativamente su costi e tempi. Il problema è l'estrema sensibilità dei processi, con tolleranze strettissime, per cui problemi comuni come ugelli ostruiti, errori di allineamento o variazioni di temperatura possono bloccare la linea [72]. Allo stesso tempo, nelle officine di macchine utensili il pain point spesso è la flessibilità e il setup: per i piccoli lotti, i tempi di attrezzaggio hanno un rapporto quasi 1:1 con il costo unitario [73]. Solitamente cambiare produzione richiede di fermare la macchina, cambiare utensili, programmi e spesso pure che intervenga manualmente un operatore, causando downtime. In contesti dove la domanda di volumi cresce ma i cicli di vita dei prodotti elettronici si accorciano, questa rigidità è un pain point critico.

Le aziende devono gestire alto turnover di modelli e versioni, mantenendo però standard qualitativi elevati (come ad esempio il IPC-A-610 per assemblaggi elettronici) [72]. Un altro pain point correlato è la manutenzione degli asset produttivi: dati gli equipaggiamenti costosi, massimizzarne l'utilizzo è fondamentale. Ciò nonostante, la varietà di macchinari specializzati rende la manutenzione non così semplice: ogni tipologia ha esigenze diverse e intervalli ottimali per manutenere. Se la manutenzione è solo reattiva, il rischio di fermi improvvisi rimane alto. In risposta a ciò, infatti, si sta diffondendo l'adozione di strategie di manutenzione predittiva grazie all'uso di sensori IoT e analisi dati, spesso integrate nei sistemi di automazione di fabbrica. L'insieme di manutenzione predittiva e automazione produttiva porta un vantaggio strategico: monitorando in tempo reale le condizioni delle macchine e prevedendo i guasti, si possono prevenire downtime e ottimizzare l'OEE (Overall Equipment Effectiveness) [72]. Ad esempio, l'uso combinato di analytics e robotica consente di pianificare interventi mirati solo quando necessari, evitando fermate inutili e prolungando la vita utile degli impianti. Riguardo l'aspetto della qualità, i produttori di elettronica affrontano sfide per via della miniaturizzazione e della complessità circuitale sempre maggiori. Anche qui, sistemi di visione e AI diventano essenziali per notare anomalie diversamente invisibili, permettendo una riduzione dei difetti di assemblaggio.

Infine, non va sottovalutato il pain point riguardante le competenze e il capitale umano. La complessità tecnica di impianti elettronici e macchine CNC moderne implica bisogno di personale specializzato per programmazione, conduzione e manutenzione. Molte PMI del settore hanno problemi ad attirare o formare personale con conoscenze di AI, big data e meccatronica necessarie per sfruttare correttamente le tecnologie emergenti. Spesso, per colmare il gap si va in outsourcing.

Alimentare & Packaging

Nel settore alimentare e del packaging industriale emergono numerosi pain point legati alla pressione sui costi, alla sicurezza dei prodotti e alla variabilità della domanda. Un tema centrale è l'efficienza produttiva: margini tipicamente ridotti e alti volumi richiedono impianti veloci e affidabili. Molte linee alimentari tradizionali hanno fatto fatica a tenere il passo senza l'automazione. Un caso che chiarisce la situazione è la linea Nestlé NaturNes di pasti pronti per l'infanzia: lanciata intorno al 2000, fu ritirata perché il confezionamento manuale rendeva i costi insostenibili. Grazie unicamente alla riprogettazione del processo con un'elevata automazione la linea è stata rilanciata ottenendo successo. La soluzione era costituita da un uso intensivo di robot e visione artificiale. Il risultato è stato una produttività di circa 180 confezioni al minuto con solo 8 operatori per turno, mentre prima sarebbero stati decine. Qualità e sicurezza sono l'altro aspetto

fondamentale; infatti, ogni prodotto alimentare deve essere sicuro e conforme, andando quindi ad introdurre pain point legati al controllo qualità. Nella linea citata, ad esempio, è stato implementato un sistema di visione che ispeziona il 100% dei piatti sigillati e scarta automaticamente qualsiasi confezione che rischi o abbia contaminazioni sul bordo di saldatura [74]. Questa ispezione al 100% garantisce che non vengano lasciati uscire lotti contaminati, ma necessita di tecnologie avanzate e integrazione nel flusso ad alta velocità.

Un altro pain point si concentra sulla flessibilità e sui frequenti cambi di formato. Le aziende alimentari devono organizzare tanti diversi SKU e lotti relativamente piccoli rispetto all'industria pesante. Questo si traduce in frequente cambiamento della produzione sulla stessa linea, con ciò che ne consegue, ovvero operazioni di pulizia e riconfigurazione, ad esempio. Un'altra criticità emersa di recente è la carenza di manodopera in questo settore. Molte aziende utilizzavano manodopera non specializzata per operazioni di confezionamento, pallettizzazione, ecc.; recentemente con eventi come la pandemia e cambi di scenario politico hanno reso difficile reperire questi operatori, causando colli di bottiglia. Nel 2020, ad esempio, il settore food & beverage britannico, con alta presenza di lavoratori dell'Est Europa, ha subito una importante riduzione dell'offerta di personale, forzando le aziende ad accelerare l'automazione: le installazioni di robot in quel settore nel Regno Unito, infatti, sono circa raddoppiate (+96%) rispetto all'anno prima [9]. Logistica interna e fine-linea sono infatti diventate aree ad alta presenza di robot, impiegati per palletizzare, inscatolare e alimentare le linee, riducendo la necessità di operatori manuali e assicurando un output costante 24/7. In generale, l'adozione di questo livello di automazione nel food & packaging sta portando ad una trasformazione del settore stesso: non aumenta della qualità e produttività, miglioramento delle condizioni di lavoro, eliminazione dei compiti ripetitivi e gravosi per gli operatori [75].

Fino a qui si è visto cosa non funziona e dove i sistemi tradizionali sono limitati. In seguito, verranno esplorati i perché, di fronte a queste mancanze, l'adozione di robot umanoidi può rappresentare una risposta strategica e giustificabile a livello economico.

3.3 Why Humanoids?

Negli ultimi anni si è potuto notare un forte aumento dell'interesse dell'industria nei confronti dei robot umanoidi nel settore manifatturiero. Dalle start-up alle grandi aziende ci sono ogni giorno annunci di prototipi e investimenti, mentre analisti e consulenti prevedono una rapida crescita di questo mercato. Goldman Sachs, ad esempio, stima per gli umanoidi un mercato potenziale di circa 38 miliardi \$ entro il 2035, e volumi di vendita che potrebbero andare oltre i 1,4 milioni di elementi

[3]. Altri documenti descrivono prospettive ancora più ottimistiche: secondo Bain & Company le proiezioni di mercato al 2035 variano da 38 miliardi fino a più di 200 miliardi \$ [4]. Queste cifre indicano esserci aspettative elevate riguardo alla diffusione degli umanoidi in fabbrica, considerate da alcuni come una potenziale “next big thing” del mondo tecnologico. Il quesito fondamentale, però, è perché proprio adesso dei robot antropomorfi stiano attirando così tanta attenzione e capitali nel manufacturing, un ambito già largamente automatizzato da anni, addirittura decenni. La risposta probabilmente va cercata, più che nelle capacità tecniche intrinseche di questi robot, comunque parecchio avanzate, bensì in due driver strutturali che caratterizzano in maniera trasversale il contesto industriale di oggi: carenza di manodopera qualificata e pressione crescente nella riduzione dei costi operativi in un mercato che risulta diventare sempre più competitivo e incerto. Per meglio dire, l’adozione degli umanoidi è spinta da una doppia necessità, sociale ed economica, più che dalle sole promesse della nuova tecnologia. Segue un’analisi di questi due fattori principali, mettendo in luce come essi stiano alimentando il fenomeno. I vantaggi tecnici degli umanoidi, in termini di versatilità, mobilità, collaboratività e adattabilità, restano importanti, ma diventano essenzialmente una sorta di catalizzatori dell’adozione e da giustificazione dell’investimento; i motori profondi del trend sono invece le dinamiche del lavoro citate e i costi.

Emergenza demografica e carenza di manodopera qualificata

Il manifatturiero a livello internazionale sta affrontando una crescente difficoltà nel trovare e mantenere al suo interno forza lavoro operaia qualificata. Questa questione è alimentata da tendenze demografiche di lungo termine: invecchiamento della popolazione lavorativa e il debole ricambio generazionale nei mestieri tecnici stanno riducendo la disponibilità di queste mansioni. Nei principali paesi industrializzati la forza lavoro manifatturiera sta invecchiando sensibilmente. Negli USA, per esempio, la quota di lavoratori manifatturieri con età maggiore di 55 anni è partita da circa il 10% nel 1995 fino ad oltre il 25% nel 2025, mentre nello stesso periodo il totale dell’occupazione nel settore è diminuito da 20,5 a 15 milioni [76]. Questo significa che un quarto della forza operaia è prossimo al pensionamento, senza un proporzionato ricambio generazionale: un fenomeno che porta alla perdita di competenze e conoscenze tecniche non trasmesse alle nuove generazioni [76]. Non è casuale che quasi il 60% delle aziende manifatturiere USA nel 2024 menzionassero l’incapacità di attrarre e trattenere lavoratori qualificati come la propria principale sfida [13]. Anche per Europa e Giappone si parla di dinamiche simili di invecchiamento e carenza di personale tecnico giovane. I giovani sono sempre meno intenzionati ad intraprendere carriere in fabbrica: come osserva uno studio McKinsey, spesso i potenziali talenti più giovani sono

disinteressati verso i lavori manifatturieri tradizionali [76], che risultano faticosi e meno attraenti rispetto ad altri. Ciò che ne conviene è un basso tasso di ricambio generazionale: pochi nuovi operai entrano, mentre molti esperti se ne vanno.

Le conseguenze di questa tendenza sono intuibili. Molte posizioni operative rimangono scoperte, andando a rallentare la produzione e costringendo le aziende a prendere soluzioni temporanee (straordinari, interinali, esternalizzazioni) pur di colmare i vuoti di organico. Uno studio Deloitte-Manufacturing Institute del 2024 stima che solo negli Stati Uniti fino a 1,9 milioni di posti di lavoro manifatturieri potrebbero rimanere scoperti nei prossimi dieci anni se non si interviene su questa mancanza di skill [13]. Globalmente, Bain & Company prevedono un potenziale disavanzo di quasi 8 milioni di operai manifatturieri entro il 2030 rispetto alla domanda di lavoro prevista [4]. Queste cifre disegnano uno scenario di mancanza sistematica di manodopera: le aziende semplicemente non trovano abbastanza persone qualificate per i ruoli disponibili, soprattutto nei contesti produttivi richiedenti competenze tecniche specifiche (saldatori, manutentori, macchinisti, operatori CNC, ecc.). In più, formare nuovi lavoratori specializzati sta diventando più difficile e lento. La sempre maggiore complessità dei processi produttivi e delle macchine necessita di lunghi periodi di formazione: mediamente servono più di due mesi (circa 70 giorni) solo per trovare un operaio di produzione specializzato, secondo un'indagine della Manufacturing Institute [77], a cui si aggiungono altrettanti mesi di affiancamento sugli impianti prima che un neoassunto sia pienamente produttivo. Ciò significa che anche quando un giovane è assunto, servono tempo e investimenti per farlo diventare effettivamente operativo. Nel mentre, i veterani vanno in pensione. Non stupisce quindi che, secondo alcune stime, fino a 6 posti su 10 in ambito manifatturiero restino scoperti a lungo o non vengano del tutto coperti in mancanza di candidati adatti [77]. Questa situazione rappresenta una vera e propria emergenza demografica per il settore: senza interventi, intere linee produttive rischiano di rimanere sottorganico cronico. I robot umanoidi si inseriscono direttamente in questo contesto come risposta tecnologica a tali problemi di forza lavoro. Grazie al loro fattore antropomorfo, infatti, possono potenzialmente sostituire o aiutare gli esseri umani in molte mansioni operative, riuscendo così ad alleviare la carenza di personale e riducendone i costi. Diversamente dai robot tradizionali confinati a compiti specifici, gli humanoidi sono pensati per muoversi in ambienti fatti a misura d'uomo e per svolgere compiti diversi, rendendoli candidati ideali per coprire i buchi di organico in reparti dove mancano operatori. Va evidenziato che questa motivazione di mitigare la scarsità di manodopera qualificata è uno dei motivi principale degli attuali investimenti: come spiega Goldman Sachs, i robot umanoidi risultano particolarmente appetibili non solo per lavori “pericolosi, sporchi e noiosi”, ma anche perché possono aggiungere

forza lavoro ulteriore nei settori in cui non ci sono abbastanza lavoratori disponibili [3]. In altre parole, l'interesse in crescita nei confronti degli umanoidi può essere visto come una risposta sistematica all'emergenza demografica nel mercato del lavoro industriale.

Pressioni economiche e riduzione dei costi del lavoro

Parallelamente alla spinta demografica, c'è una seconda macro-causa che rende gli umanoidi così attraenti: la forte pressione competitiva e finanziaria che forza l'abbattimento dei costi operativi e aumenti di produttività. Il settore manifatturiero globale si trova in un contesto di margini sempre più ristretti, a causa di molteplici fattori: la competizione internazionale è accesa (in particolare con l'ingresso di nuovi attori da economie emergenti), i clienti esercitano pressioni sui prezzi, e al contempo le aziende affrontano costi crescenti legati alla transizione tecnologica e alla volatilità dei mercati. Ad esempio, nell'industria automotive, settore manifatturiero di punta, i fornitori di componenti hanno visto i loro profitti ridursi in maniera drastica: uno studio di Lazard e Roland Berger parla di un EBIT margin medio globale dei fornitori automobilistici che sarebbe potuto ridursi fino al 4,7% nel 2024, dopo un calo precedente già del 5,3% del 2023 e molto sotto ai livelli pre-pandemia [15]. Tra le cause si trovano volumi stagnanti, incertezza geopolitica, concorrenza crescente e rincaro dei costi produttivi, che insieme si nutrono dei margini [15]. In particolare, la transizione all'elettrico nel settore auto sta imponendo investimenti consistenti e una guerra dei prezzi sui veicoli elettrici, e non solo, che taglia i profitti [15]. Allo stesso modo, in molti comparti manifatturieri tradizionali i costi delle materie prime ed energetici sono aumentati negli ultimi anni, e le impostazioni riguardo all'investire in sostenibilità e digitalizzazione aggiunge ulteriori oneri. Parallelamente, il costo del lavoro industriale è in crescita in diverse aree del mondo, sia in termini assoluti sia relativi. Paesi che erano considerati a basso costo del lavoro come Cina e India hanno subito un rapido aumento dei salari di questo settore: secondo Boston Consulting Group, il salario medio degli operai in Cina è raddoppiato dal 2007, e in India è cresciuto di oltre il 50% nello stesso periodo [11]. Questo trend riduce i pro del delocalizzare la produzione in paesi emergenti, spingendo le aziende a cercare nuovi modi per contenere la spesa del personale. Anche in Occidente, la forte domanda di manodopera post-pandemia ha portato rialzi salariali significativi nel settore industriale: ad esempio nell'Unione Europea il costo del lavoro è cresciuto di circa il 5% solo tra il 2023 e il 2024 [4], e negli USA la paga oraria media manifatturiera ha raggiunto livelli record nel 2025 [78]. Pur tenendo conto dell'inflazione, i costi del lavoro per le imprese manifatturiere rimane alto. I dati del Bureau of Labor Statistics indicano che negli Stati Uniti la spesa per salari e benefit nel manufacturing (Employment Cost Index) è salita del +3,8%

nel 2024 [13]. Inoltre, dal 2019 al 2024 i costi unitari del lavoro sono aumentati in ben 81 su 86 specifici rami manifatturieri analizzati dal BLS [79], sintomo di un fenomeno piuttosto generalizzato. In questo scenario, investire in automazione avanzata diventa per molti un passaggio quasi scontato. Sostituire attività manuali con robot può infatti ridurre i costi operativi nel medio-lungo termine, aumentando allo stesso tempo la produttività e il livello di prevedibilità delle prestazioni. Un report di Bain evidenzia che tra il 2022 e il 2024 il costo unitario di un robot umanoide è già diminuito di almeno il 40%, mentre il costo del lavoro umano in Europa è salito del 5% annuo, una dinamica che sta velocemente portando gli umanoidi verso una sorta di parità di costo con il lavoro umano non specializzato [4]. Si tenga a mente, ad esempio, che un umanoide disponibile in commercio nel 2023 al prezzo di circa 15-20 mila \$ (come il modello Unitree) ha un costo paragonabile al salario annuo di un lavoratore a tempo pieno con retribuzione minima negli USA [4]. Con ulteriori economie di scala e riduzioni di prezzo attese nei prossimi anni, lo scenario per rimpiazzare o affiancare operai con robot diventa sempre più convincente, almeno dal punto di vista finanziario. Ridurre il costo del lavoro tramite automazione non è cosa nuova, ma i robot tradizionali potevano coprire solo determinate mansioni ripetitive; gli umanoidi, grazie alle loro peculiarità, promettono di estendere l'automazione anche a compiti finora svolti da persone, amplificando il risparmio potenziale. Secondo alcune analisi, l'adozione accelerata di robot avanzati potrebbe portare a ridurre i costi del lavoro nel manifatturiero di una percentuale significativa nel prossimo decennio, contribuendo a recuperare margine in settori a bassa redditività [80]. Dall'ottica del management, investire in umanoidi è quindi un modo per aumentare la capacità delle aziende di essere economicamente resilienti, dipendendo meno dalla forza lavoro operaia e più su asset automatizzati dal costo costante e ammortizzabile. In tempi di incertezza, ridurre il costo del lavoro grazie all'automazione diventa una leva strategica fondamentale per mantenere la competitività. Tutto ciò spiega perché molti investimenti si stiano orientando sui robot umanoidi, visti come il pezzo mancante per completare l'automazione della fabbrica e ottenere ulteriori guadagni di efficienza.

Nonostante quanto detto, è fondamentale interpretare questi benefici potenziali apportati dagli umanoidi come dei fattori abilitanti, e non come le cause originarie del fenomeno. In altri termini, le aziende non investono in umanoidi semplicemente perché sono tecnologicamente avanzati, ma perché attraverso quelle capacità tecnologiche possono affrontare problemi più impellenti.

In definitiva, il “Why Humanoids?” trova risposta in questa convergenza di fattori: meno lavoratori disponibili e più bisogno di efficienza. Il robot umanoide diventa così il punto d'incontro tra la

crisi delle risorse umane e la spinta all’automazione, incarnando una soluzione innovativa a problemi assai concreti e attuali del mondo manifatturiero, a misura d’uomo.

Si prosegue nella sezione successiva dove verranno analizzate in dettaglio le implicazioni tecniche come i sistemi hardware-software, la manipolazione e percezione, e i meccanismi di apprendimento che definiscono l’efficacia di un umanoide nel colmare il gap di automazione di questo macrosettore.

3.4 Implicazioni per i robot umanoidi come risposta ai divari tecnologici

I robot umanoidi sono una dei nuovi orizzonti dell’automazione avanzata, pensati proprio per lavorare in ambienti umani svolgendo dei compiti ad alta variabilità grazie a spiccate capacità in destrezza e adattabilità, tanto da assomigliare a quelle umane. A differenza dei robot tradizionali, più legati a funzioni specifiche e rigide, gli umanoidi sono progettati secondo una forma antropomorfa (busto, braccia, mani e spesso gambe) e capaci di intelligenza artificiale avanzata, questo gli permette di muoversi e interagire efficacemente in spazi e processi nati per operatori umani [81]. Seguono le principali caratteristiche tecnologiche che potrebbero rendere gli umanoidi capaci di mitigare i pain points del manifatturiero:

- **Mobilità bipede e agilità:** capacità di deambulare, salire le scale, attraversare varchi, aprire porte e operare su postazioni progettate a “misura d’uomo”, senza necessità di riconfigurare gli impianti [82].
- **Manipolazione bi-manuale:** braccia articolate con mani prensili capaci di utilizzare utensili e afferrare oggetti di varia forma permettono di svolgere mansioni di assemblaggio, movimentazione materiali e interazione con macchinari esistenti a misura d’uomo.
- **Visione artificiale e sensoristica:** sfruttando telecamere 3D, lidar e sensori di forza integrati, il tutto combinato e potenziato da algoritmi di visione AI, l’umanoide è capace di percepire l’ambiente intorno a sé, riconoscendo oggetti, leggendo strumenti e/o indicatori e muovendosi tra gli ostacoli.
- **AI e auto-apprendimento:** l’AI consente al robot di pianificare le proprie azioni, imparando nuovi compiti grazie ad esperienza o alla simulazione, cambiando in maniera adattiva il proprio comportamento nel caso ci fossero variazioni nel compito e decidendo in maniera autonoma (a basso livello) real-time [83].
- **Interazione sicura e collaborazione:** il concetto di partenza, prendendo spunto anche proprio dai cobot, è la sicurezza nell’interazione; infatti, grazie ad attuatori a bassa inerzia, sensori anticollisione e software di controllo avanzato l’umanoide può lavorare a fianco degli

operatori, riconoscendone la presenza e reagendo prontamente per evitare contatti o situazioni pericolose. Oltre ai sistemi di interazione sicura è importante nominare anche tutto ciò che sono le interfacce user-friendly (voce, gesti, tablet) utilizzate per comandare il robot, le quali facilitano l'integrazione di queste tecnologie in team eterogenei uomo-robot. È proprio grazie a queste tecnologie e accorgimenti, oltre alle sembianze intenzionalmente antropomorfe, che l'integrazione degli umanoidi nel manifatturiero può essere favorita, evitando attriti con gli operatori umani, ad oggi ancora in maggioranza nei processi produttivi.

- **Resilienza e operatività continua:** la possibilità di sostituzione quasi istantanea (“hot-swap”) delle batterie, più i sistemi di auto-diagnostica, hanno come obiettivo quello di garantire il funzionamento più prolungato possibile, ricercando il 24/7, con down-time ridotto al minimo. Inoltre, gli umanoidi sono pensati per resistere a condizioni dell'ambiente in cui sono inseriti anche austere ad un certo livello (polvere, umidità, variazioni termiche) e poter operare in vari reparti dello stabilimento, proprio permettendogli salvare gli operatori dall'esposizione a certi rischi.

È quindi proprio grazie a queste capacità che i robot umanoidi sembrano capaci di poter “colmare le lacune di automazione che i sistemi tradizionali non potevano indirizzare”, gestendo compiti che fino ad oggi erano ritenuti estremamente tortuosi da automatizzare come l'assemblaggio complesso in ambienti non strutturati o la collaborazione attiva con umani [83]. Secondo ARK Invest (2025), questa nuova famiglia di robot versatili sarebbe capace di “sganciare il lavoro fisico dall'output economico, generando un'esplosione di produttività senza precedenti” [12]. Di seguito discuterà dell'effetto mitigante degli umanoidi nei confronti dei i pain points del manifatturiero di cui si è fatta menzione precedentemente.

Mitigare la carenza di manodopera e assicurare la continuità operativa

I robot umanoidi tentano di risolvere direttamente alla mancanza di personale potendo compiere mansioni sostituendo e/o affiancando gli esseri umani, aumentando la forza lavoro effettiva a disposizione. Considerando l'alto livello di versatilità, un singolo umanoide può svolgere diversi compiti in base a quali sono i bisogni, fungendo da “jolly”, ovvero capace di andare dove è richiesto tra una svariata lista di postazioni e mansioni all'interno della fabbrica. Oltre a quanto appena detto, gli umanoidi sono potenzialmente capaci di lavorare su turni 24/7, risolvendo i vuoti di personale nelle ore notturne o nei festivi, senza bisogno di parlare di straordinari. Questa capacità di operare senza interruzioni permette alle aziende incrementi nella produzione oltre ad un più efficace utilizzo degli impianti, andando oltre ai tradizionali limiti delle 8 ore per 3 turni.

ARK Invest mette in luce il fatto che i progressi nell'AI e la riduzione dei costi dell'hardware stiano facendo diventare questi robot sempre più vantaggiosi, anche da un punto di vista economico e di ritorno dell'investimento, tanto che in certi casi il VAN (valore attuale netto) di un umanoide potrebbe superare quello di un dipendente umano, appena sarà raggiunto il punto di non ritorno di costo-efficienza [12]. Nel prossimo futuro, "assumere" un robot come questo potrebbe quindi essere meno costoso che cercare, assumere e formare nuovi operatori, soprattutto in mercati come questi. Un altro beneficio è che gli umanoidi, essendo loro che svolgono i compiti più umili e faticosi, permettono agli operatori umani esistenti di concentrarsi su mansioni a più alto valore aggiunto, una volta formati in modo da poter passare nel nuovo ruolo. Questo doppio fenomeno può sia aumentare la soddisfazione del personale che la produttività generale delle linee. In logistica, si distingue GXO (con più di 870 magazzini nel mondo) che collabora con tre diversi modelli di umanoidi (Digits, Reflex, Apollo) per trovare soluzioni alle prossime difficoltà nel trovare addetti di magazzino, oltre a voler rimanere tra i leader del suo settore.

Guardando a lungo termine, come suggerisce un rapporto UBS, potrebbero arrivare a comporre una forza lavoro di centinaia di milioni di lavoratori robot, entro metà secolo, trasformando completamente la demografia delle fabbriche [60] e non solo.

Aumento della sicurezza: robot al posto dell'uomo in compiti pericolosi

Come già anticipato in precedenza, gli umanoidi sono capaci di lavorare in ambienti progettati per l'uomo senza particolari limiti fisici, potendo così utilizzarli in avori pericolosi, riducendo moltissimo l'elemento umano dal rischio. Se dotati di coperture e sensori adeguati, i robot sono capaci di lavorare in ambienti ostili (come possono esserlo una cella frigorifera a -20°C, forni a 60°C, aree con emissioni nocive) senza danneggiarsi, cosa che un essere umano invece farebbe. Questo porterebbe all'eliminazione all'esposizione di quei lavoratori solitamente sottoposti alle sopracitate condizioni, con benefici immediati sulla sicurezza all'interno della fabbrica. Un esempio concreto è l'iniziativa di HD Hyundai già citata dove i saldatori umanoidi sviluppati in partnership con start-up specializzate sono stati ideati per automatizzare la saldatura dentro cantieri navali, processi che espongono gli addetti a fumi metallici tossici, luce accecante e potenziali ustioni [59]. HD Hyundai ritiene che grazie a questa tecnologia il lavoro umano nei cantieri possa diventare molto più sicuro, lasciando che siano gli umanoidi responsabili delle operazioni più pericolose [59]. Nell'automotive, invece, Tesla annuncia che il Optimus sarà utilizzato nelle Gigafactory per svolgere le attività fisicamente pesanti e ripetitive, andando a ridurre al minimo l'impiego di forza operaia in mansioni che possono portare a infortuni [83]. Anche nell'ambito

della manutenzione industriale ci si aspetta che l'uso di umanoidi in impianti funzionanti elimini il rischio per gli operatori. È importante dire che l'ingresso di umanoidi in contesti come questi deve essere combinato con adeguate misure di sicurezza, così da evitare di sostituire un pericolo con un altro. A proposito, le normative dovranno quindi evolvere: ad oggi esistono principalmente standard per robot industriali e cobot, ma l'integrazione di umanoidi richiede aggiornamenti normativi apposta per loro.

Automazione delle attività ripetitive e miglioramento di qualità ed ergonomia

I robot sono fatti apposta per eseguire compiti ripetitivi mantenendo la precisione e senza stancarsi, eliminando variabilità ed errori dati da fatica o noia a cui invece possono essere soggetti gli umani. Grazie agli attuatori di precisione e ai controlli AI che li caratterizzano, gli umanoidi possono mantenere ritmi costanti 24/7 senza cali di concentrazione, assicurando in questo modo degli output di qualità migliore. Questa caratteristica, tra le altre, li rende perfetti per automatizzare operazioni seriali come quelle prima classificate come pain points per il settore manifatturiero. Quindi se si riduce l'affaticamento si migliora la qualità e si riducono i costi dati dai difetti. Oltre alla qualità, è possibile constatare anche un impatto positivo sull'ergonomia: i compiti usuranti per l'uomo sono semplici per gli umanoidi. Nella realtà di GXO, Digit movimenta case con un certo peso in sinergia con robot mobili e li posiziona su nastri trasportatori [84]. In questo progetto pilota è il robot a svolgere tutti quei sollevamenti giornalieri, e non gli operatori, andando così a ridurre sensibilmente lo sforzo fisico umano. Un altro vantaggio è la maggiore attrattività dei ruoli lavorativi che nascerebbero e aumenterebbero dopo l'inserimento di questa tecnologia in fabbrica; infatti, sollevare continuamente pezzi o eseguire assemblaggi noiosi non motiva un operaio, mentre supervisionare un gruppo di robot o occuparsi delle operazioni più ad alto livello può rendere il lavoro più vario e stimolante. Tutto ciò può portare, nel medio termine, ad una riduzione del ricambio e trattenere più a lungo personale esperto.

Maggiore flessibilità produttiva e adattabilità ai cambiamenti

Uno dei motivi per cui si sta parlando così tanto di loro, dei robot umanoidi, è proprio la loro versatilità d'impiego, che può finalmente iniziare a risolvere le questioni legate alla rigidità della linea di produzione. L'umanoide è capace di adattarsi a compiti diversi, a contesti non strutturati, molto più facilmente rispetto alla tradizionale robotica. Significa che lo stesso robot può essere riprogrammato (e anche in poco tempo) per passare da un'attività di un certo tipo ad una di un altro, senza dover adattare l'infrastruttura. Questo significa non dover ridefinire o riadattare il layout delle linee esistenti; infatti, l'umanoide opera in ambienti pensati per l'uomo, senza bisogno

di modifiche strutturali [81]. In più, grazie alla visione AI e al machine learning, gli umanoidi gestiscono la variabilità attorno a loro, distinguendo diverse tipologie di pezzi su un nastro e reagendo di conseguenza oppure apprendendo attraverso esempi. BMW sta testando nelle proprie fabbriche l'umanoide Figure 02 proprio per questi scopi: maggior flessibilità, carenza di manodopera e automazione di compiti impossibili [83]. Questa flessibilità seamless nel cambiare ruolo porta alle aziende la possibilità di riconfigurare velocemente l'utilizzo dei robot al variare del mix produttivo, senza i tempi morti di riprogrammazione dei robot tradizionali. Il beneficio non si misura solo in termini di flessibilità, bensì di resilienza; infatti, nel caso ci siano picchi di domanda o cambi, gli umanoidi vengono riallocati dove necessario. Una loro ulteriore capacità, proprio grazie agli algoritmi di reinforcement learning e all'accesso a librerie cloud, è il loro diventare sempre più capaci, nei singoli task e nel passare da uno all'altro al passare del tempo. Per fornire un altro esempio, c'è Sanctuary AI che sta addestrando il suo umanoide Phoenix con decine di tasks diversi in ambienti di simulazione, per renderlo un robot generalista pronto ad ogni evenienza di produzione [60]. Per le PMI con molteplici mix di prodotti, in particolare, questa tecnologia potrebbe aiutare: ARK Invest evidenzia che gli umanoidi sono la prima tecnologia di automazione accessibile anche alle piccole imprese, che fino ad oggi non potevano permettersi soluzioni strutturate e su misura così poco costose [12].

4. Casi d'Uso e Scenari Disruptive

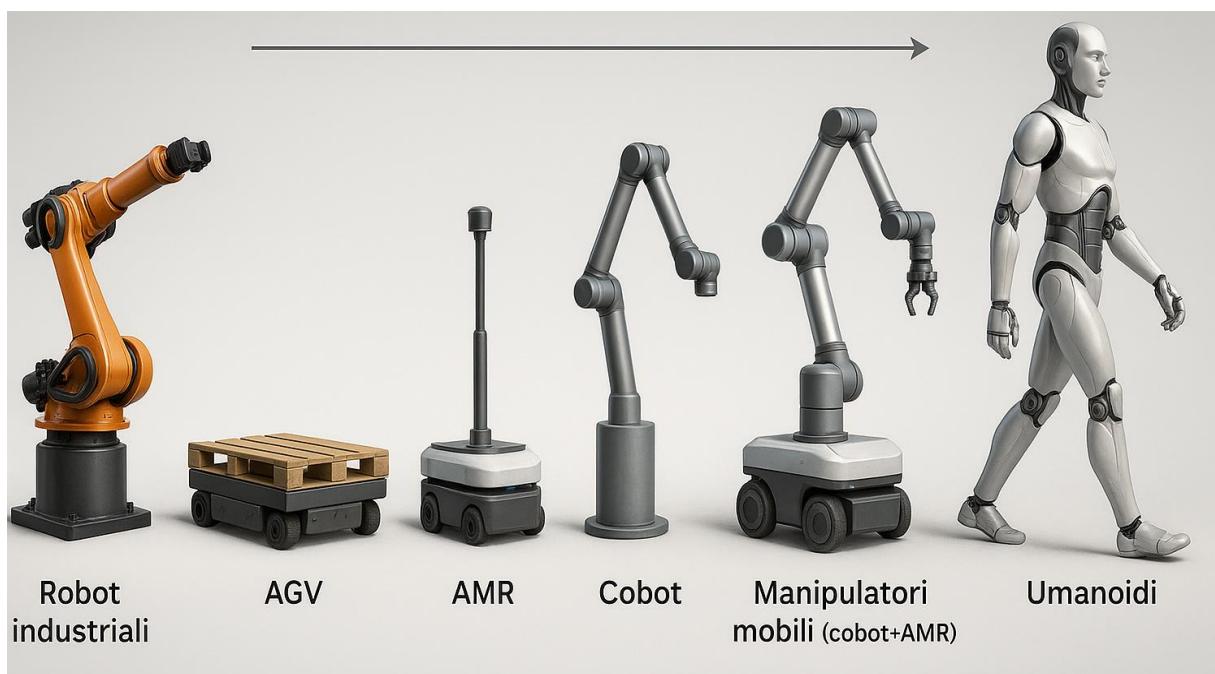
4.1 Evoluzione verso i robot umanoidi

Negli ultimi decenni i robot per l'industria si sono evoluti dai robot fissi tradizionali, limitati in aree protette, fino ai robot umanoidi di oggi pensati per ambienti e compiti a misura d'uomo. In un primo momento, i manipolatori erano in postazioni fisse, operavano in maniera ripetitiva ad alta velocità in linee produttive rigide. Più tardi, l'attenzione è stata per i robot collaborativi (cobot), capaci di condividere in sicurezza lo spazio di lavoro con gli operatori umani [85]. Iniziano ad essere introdotto intorno al 2010, beneficiando della norma tecnica ISO/TS 15066:2016 che ha definito i requisiti di sicurezza per il loro operare nelle prossimità degli operatori umani [85]. Allo stesso tempo, la stessa esigenza di flessibilità ha portato allo sviluppo di robot mobili: inizialmente veicoli a guida automatica (AGV) vincolati a percorsi fissi, poi AMR (Autonomous Mobile Robots) capaci di navigazione autonoma. Questi robot mobili industriali (IMR, per ANSI/RIA R15.08-1:2020) sono utilizzati nella logistica interna (ma non solo) per trasporto e asservimento delle linee, con vantaggi in termini di adattabilità, essendo capaci, ad esempio di deviare ostacoli e ricalcolare il percorso, a differenza degli AGV che si fermano finché la via non viene liberata

[86]. Grazie al progresso tecnologico, con gli ultimi anni, si arriva ai robot umanoidi general-purpose: antropomorfi e dotati di locomozione (bipede o ruote) e destrezza simil-maniale, ideati per compiti eterogenei in ambienti progettati per l'uomo senza necessità di modifiche sostanziali a strutture o processi [87]. La definizione dell'International Federation of Robotics (IFR) dice che un robot umanoide è un robot dall'aspetto estetico umanoide (generalmente con due braccia con mani, due gambe, busto e testa) capace di svolgere compiti in ambienti nati per gli esseri umani senza doverli modificare [88]. In altre parole, ciò che distingue l'umanoide è l'intento di agire come “operaio universale” negli ambienti e con gli oggetti dell'uomo, potenzialmente in maniera complementare e sinergica con le tecnologie robotiche esistenti [89].

4.1.1 Differenze tra cobot, AMR e umanoidi

Per contestualizzare il posizionamento dei robot umanoidi rispetto alle tecnologie odiere, risulta utile un confronto più approfondito con almeno i robot collaborativi (cobot) e con gli AMR (robot mobili autonomi). Queste tre categorie rappresentano infatti l'evoluzione verso crescente versatilità e integrazione negli spazi umani, ma presentano differenze consistenti per quanto riguarda struttura, funzionalità e tipiche applicazioni.



*Figura 1:
Dalla robotica fissa all'umanoide: crescita di autonomia, mobilità e destrezza. (immagine generata tramite Chat GPT solo con scopo di visualizzazione)*

Definizioni normative

La ISO 8373:2021 parla in termini generali di un robot industriale come “manipolatore multifunzione, riprogrammabile, comandato in maniera automatica su tre o più assi e che può essere fisso o su base mobile, per uso in applicazioni di automazione industriale” [90]. Se si guarda a questa definizione si può notare la centralità dei temi come la reprogrammabilità, la multifunzionalità e la capacità manipolatoria, ovvero più giunti articolati per muoversi nello spazio [90]. In questa categoria si vedono rientrare sia robot tradizionali da cella sia la variante evoluta collaborativa. In realtà con “cobot” di per sé non si sta parlando di un robot in particolare, bensì di un modo d’uso sicuro di un robot industriale. La ISO 10218-1:2011 spiega la collaborazione come “lo stato in cui robot appositamente progettati lavorano in collaborazione diretta con un operatore umano all’interno di uno spazio di lavoro condiviso” [85]. Si potrebbe quindi dire che un robot è collaborativo se è progettato apposta in modo da operare senza barriere accanto alle persone [90]. La ISO/TS 15066:2016 spiega esserci quattro modi di collaborazione diversi possibili (monitoraggio con arresto sicuro, guida manuale, limitazione di velocità e distanza, limitazione di potenza e forza) e diverse soglie di sicurezza per il contatto con l’umano. In breve, un cobot è un manipolatore industriale intrinsecamente sicuro che, pur avendo un po’ meno prestante rispetto ai robot tradizionali (carichi più bassi, velocità limitate), può condividere la postazione con l’uomo aumentando flessibilità ed ergonomia in operazioni come assemblaggi, manipolazioni di precisione o asservimento macchine [90].

Per quanto riguarda i robot mobili, nel 2020 è stato pubblicato lo standard ANSI/RIA R15.08-1 riguardante il concetto di Industrial Mobile Robot (IMR), con la classifica delle sue sottocategorie. Si sta parlando in questo caso di un tipo di robot capace di muoversi autonomamente a terra in un ambiente industriale con scopo trasporto o manipolazione. La definizione raccoglie sia i classici AGV, sia i più avanzati AMR [86].

La R15.08 distingue:

- Tipo A → piattaforma mobile autonoma senza aggiunte, tipico AMR puro,
- Tipo B → piattaforma mobile con aggiunte attive/passive ma senza braccio robotico manipolatore,
- Tipo C → piattaforma mobile, AMR o AGV, che porta un braccio robotico manipolatore [86].

Quest’ultimo è spesso chiamato mobile manipulator. In ambito industriale, gli AMR (A/B) sono ormai conosciuti nella logistica interna (trasporto di materiali tra magazzini e linee, rifornimento stazioni, rimozione scarti) e per servizi di handling, mentre i mobile manipulator (C) sono più che

altro un ponte, o un’alternativa, verso gli umanoidi, visto che aggiungono la possibilità di agire sugli oggetti trasportati. È lo standard VDA 5050, con la sua prima versione 2019, revisione 1.1 del 2020, a cercare di istituire un protocollo per la comunicazione e la gestione delle flotte eterogenee di AGV e AMR. È promosso dall’automotive tedesco e definisce un’interfaccia unificante i robot mobili provenienti da diverse case produttrici e il loro software di supervisione della flotta [91]. In particolare, questo standard ha come obiettivo quello di rendere possibile l’interoperabilità tra prodotti di brand diversi così da favorire l’integrazione di decine di AMR anche in realtà con una logistica complicata e, per l’appunto, eterogenea.

Infine, si consideri la nozione di robot umanoide. Non esiste (ancora) uno standard ISO consolidato apposta per gli umanoidi, ma la definizione base la si ritrova sempre dalla ISO 8373: un humanoid robot è “un robot dotato di corpo, testa e arti, con aspetto e modalità di movimento simili a quelli umani” [88]. Questa descrizione esprime la doppia natura antropomorfa sia statica che dinamica. Naturalmente non rientrano in questa categoria solo i robot bipedi a corpo intero, ma anche le varianti parziali. Possono quindi esserci dalle sottili alle spesse differenze tra un mobile manipulators e un umanoide: ad esempio, RoBee di Oversonic è raccontato come “umanoide su ruote” [92], così come il Digit di Agility ha braccia , gambe e tutto il resto ma con strutture particolarmente semplificate. In generale, però, si cerca di chiamare umanoide solo quel robot che mira a replicare il più possibile forma e movimenti umani in contrapposizione ai già citati mobile manipulators che non presentano invece necessariamente un aspetto antropomorfo completo.

Confronto tecnico-funzionale

Di seguito si tenterà di sintetizzare quanto più possibile le principali differenze tra un cobot industriale, un robot mobile autonomo (AMR) e un robot umanoide, considerando diversi criteri chiave.

Mobilità: Il cobot è essenzialmente un manipolatore fermo; che sia fissato ad un banco o su una piattaforma mobile, di per sé non si sposta autonomamente durante il funzionamento. L’AMR al contrario punta tutto sul movimento e spostamento di merce ma senza considerare la possibilità di manipolarlo. Gli AMR industriali ad oggi raggiungono velocità di 1-2 m/s e possono coprire perimetri estesi dello stabilimento muovendosi dinamicamente. Può anche un robot umanoide muoversi nell’ambiente, ma in modo differente: se bipede, la locomozione è deambulazione, con velocità ad oggi ancora troppo basse; se montato su ruote, invece, la velocità aumenta ma rimane la possibilità di interagire con strutture ad altezza variabile per via del movimento del busto.

Risulta sicuramente vincente, almeno per il discorso dell'accessibilità, l'utilizzo di gambe robotiche per poter accedere a luoghi difficilmente accessibili (scale, ostacoli alti, operazioni su scaffalature di una certa altezza con quindi l'utilizzo di una scala, ad esempio) potendo condividere gli spazi pedonali.

Manipolazione e destrezza: questo è sicuramente l'aspetto nel quale il cobot, articolato spesso a 6 o 7 assi, eccelle. Ad oggi questi robot sono precisi nell'ordine del millimetro o meno, risultando infatti perfettamente adatti ad assemblaggi elettronici, avvitature, incollaggi e operazioni delicate; possono essere customizzati attraverso end-effectors avanzati come pinze, utensili e camere di visione. Un AMR base, effettivamente, non ha a disposizione bracci manipolatori: interagisce quindi solo con carichi a terra gestiti in un certo modo (piani, scaffali integrati) quindi spesso necessitando di strumenti ausiliari nei punti di carico/scarico, a meno che non sia affiancato da operatori umani che prelevano/caricano materiale. Gli AMR nascono quindi con un concetto di destrezza intrinsecamente limitata. Da tutt'altra idea nasce invece il robot umanoide, ovvero quella di unire mobilità e manipolazione: dotato di due braccia (e talvolta mani con dita) per afferrare e operare su oggetti, utilizzando utensili progettati per mani umane. È capace di destrezza sì fine ma comunque non al livello di un braccio industriale, né di un cobot: il controllo dual-arm coordinato è un campo di ricerca ancora in sviluppo. Certi humanoidi montano effettori semplici per concentrare gli sforzi su compiti grossolani, probabilmente perché per operazioni di fino e precisione si tende a preferire ancora un braccio robotico più fisso e sicuro nella precisione del movimento.

Sicurezza e interazione con l'uomo: Nasce proprio in fase di progettazione, per quanto riguarda il cobot, l'idea che esso debba essere sicuro in presenza di operatori, attraverso l'utilizzo della limitazione attiva di velocità, coppie e potenza (IEC ISO 15066 è responsabile della definizione, per esempio, della modalità Power and Force Limiting, secondo cui ci sono soglie di pressione da non eccedere affinché il contatto con l'umano non risulti doloroso, in base alla parte del corpo) e sensori di contatto/collisione. Molti cobot si fermano immediatamente se si registra un impatto o se una forza supera un limite impostato; altri cobot si fermano invece alla percezione dell'avvicinamento di una persona entro un certo raggio, grazie all'utilizzo di telecamera 3D o scanner laser (speed and separation monitoring). Per gli AMR vale un discorso molto simile: lo standard ISO 3691-4:2020 (Veicoli a guida automatica) e ANSI R15.08 parlano, ad esempio, della presenza di scanner laser di sicurezza a 360°, bumper sensibili e protocolli di frenata d'emergenza prima della collisione. La principale differenza tra questi due robot è che l'AMR tende ad aggira-

attivamente l'uomo e non cercare di collaborare in contatto con lui: nel caso degli AMR la possibilità di coesistere con l'uomo è possibile grazie a regole di traffico e sistemi antiurto molto conservativi (riduzione della velocità in ambienti affollati). Quando si parla di umanoidi la sfida è la composizione delle due precedenti, visto che questo robot combina, in un modo o nell'altro, entrambe le tecnologie. Un umanoide bipede può perdere l'equilibrio e cadere, evento che dev'essere considerato quando si valutano i rischi. I primi modelli di oggi utilizzano sensori come IMU, lidar, force-torque, integrati da algoritmi di bilanciamento per ridurre rischi di caduta, ma c'è molta strada ancora prima di poter parlare di certificazione, vista la maturità ancora insufficiente di certi aspetti. Per la parte che riguarda la manipolazione, alcuni umanoidi si ispirano naturalmente ai cobot: limitazione di coppia, giunti compliant e superfici sensorizzate per rilevare contatti in tutto il corpo [90]. Nel caso dell'umanoide, quando si parla di interazione uomo-robot si deve andare oltre e iniziare a prendere in considerazione l'uso di interfacce naturali (voce, gesti) per istruire gli umanoidi, e situazioni dove mentre si collabora il robot comprende il contesto operativo e si adatta.

Integrazione e facilità d'implementazione: questo è sicuramente un punto critico per tutte e tre queste tecnologie, e non solo; in particolare, con i cobot si nota un significativo miglioramento da questo punto di vista: non richiedono programmazione specialistica e cella dedicata, bensì hanno spesso interfacce user-friendly (programmazione con grafica a blocchi funzionali, insegnamento tramite guida manuale del braccio, etc.) e non necessitano di barriere fisiche, il che riduce i tempi di installazione. Secondo analisi di settore, un'applicazione collaborativa semplice può essere operativa in qualche settimana anziché i mesi tipici di una cella robotizzata classica [90]. Anche gli AMR sono pensati apposta per essere integrati in maniera modulare; quindi, possono essere aggiunti anche uno alla volta ad un impianto. Per gli umanoidi, guardando ai casi di applicazione pilota visti fino ad oggi, per che siano stati necessari sviluppi su misura, definizione particolareggiata dei task e spesso teleoperazione o supervisione costante da parte dell'essere umano. Non c'è ancora un modo standard per programmare un umanoide: ad oggi solitamente si utilizzano librerie open source, ma a cui segue poi un tortuoso processo di customizzazione che può essere piuttosto lungo e costoso, viste le necessità della produzione legate all'affidabilità di queste tecnologie. Nei prossimi step di sviluppo si pensa di usare la tecnica del “learning by demonstration”, per cui il robot impara osservando un operatore o attraverso teleoperazione imitativa, il tutto per cercare di ridurre più possibile il time to value; infatti, è proprio così che accade per Sanctuary dove vengono raccolte esperienze umane per addestrare poi l'AI [93] e modelli generativi per tradurre istruzioni di alto livello in azioni. Un panorama più prossimo a noi

è l'utilizzo di piattaforme cloud per la gestione, come nel caso di Digit di Agility, supportato da Agility Arc, software che permette di programmare e monitorare più umanoidi come fossero risorse logistiche, inserendoli nei flussi operativi e utilizzando mappe, missioni e diagnosi [87]. È probabile pensare che, come è vero che ci sono soluzioni plug-and-play per cobot e AMR, anche per gli umanoidi nasceranno modalità simili che renderanno più semplice l'implementazione.

Prestazioni operative: Per quanto riguarda questo punto, le tre tecnologie differiscono molto. I cobot sono fatti apposta per la precisione nei compiti e la collaborazione ravvicinata; sono quindi caratterizzati da payload e velocità moderati, eccezioni a parte. D'altra parte, gli AMR si concentrano più sul carico trasportabile, secondo certe fasce di peso, dai pochi chili, fino alle tonnellate di un container. La velocità di un AMR può aggirarsi anche intorno i 2 m/s, ma in aree dove sono presenti umani viene autolimitata. Energeticamente riescono ad avere una indipendenza dell'ordine di alcune ore continuative, andando poi a ricaricarsi autonomamente durante i momenti di bassa attività o pausa. L'umanoide di oggi è limitato in entrambi gli aspetti ancora: carico e autonomia energetica. Il motivo sta nel fatto che deve contenere il suo peso e complessità. Ad oggi la maggior parte degli umanoidi ha payload sulle braccia dell'ordine di 5-10 kg (ad esempio Digit dichiara circa 16 kg, Apollo 25 kg max [87]), sufficiente per molte operazioni logistiche leggere ma non per lo spostamento di pezzi pesanti di macchinari, compito che comunque, per fortuna, non rientra, almeno fino ad ora, nelle aspettative del mercato nei confronti di questo robot. Far camminare in maniera bipede un robot consuma molta energia, facendo diventare anche l'indipendenza energetica un punto critico. Si stanno cercando soluzioni a questo problema, come ad esempio batteria ad alta densità oppure hot-swap ma a confronto con un AMR su ruote, il secondo risulta ancor oggi molto più efficiente sul piano energetico e della capacità di carico. Questo porta a concludere che nel breve termine gli umanoidi siano effettivamente competitivi solo laddove il fattore "sembianza umana" sia un valore aggiunto indispensabile rispetto a cobot/AMR, o la loro combinazione, per essere precisi.

Flessibilità e versatilità: sotto questo aspetto l'umanoide sembra vincere sugli altri due robot, cobot secondo, AMR terzo. È vero che il cobot può essere facilmente riprogrammato per compiti diversi ma ha poi bisogno di cambiare magari utensile o di subire un fine-tuning significativo per passare da un'operazione ad un'altra, per non parlare poi del fatto che è vincolato al suo raggio d'azione fisso. Per quanto riguarda l'AMR, invece, è vero che è capace di coprire distanze lunghe e servire molte stazioni di diverso tipo, ma senza la possibilità di manipolare materiali come potrebbe un braccio con end-effector significa che non può eseguire operazioni di processo, ma solo di

trasporto. L’umanoide, in teoria, dovrebbe riuscire nell’ardua impresa di unire le due capacità appena citate, tipiche di cobot e AMR, in un’unica soluzione, diventando così capace di operare molteplici diversi tipi di task: rifornire le linee, operare controlli qualitativi a campione con telecamere, montare componenti in una stazione in assenza di personale e sistemare prodotti finiti in magazzino. Scenari come questi appena descritti naturalmente sono realizzabili solo con un contestuale sviluppo sufficiente dell’AI. Ad oggi, un umanoide è sì “multiruolo” ma deve intendersi come costruttori che chi lo progetta, lascia ancora che questo sia come una piattaforma generale su cui implementare applicazioni diverse in base al contesto in cui viene richiesto e inserito, mentre cobot e AMR tendono a essere venduti con una singola applicazione in mente, o comunque con un portafoglio applicativo molto più ridotto. Si potrebbe quindi dire che la versatilità dell’umanoide ricade principalmente sulla sua componente software, dovendo quindi essere addestrato ogni volta per un nuovo compito, come si farebbe con un operatore umano, e non sulla parte hardware modulare (o non solamente). Questo porta quindi a tempi di apprendimento e messa a punto che oggi sono un tema limite, su cui si sta cercando di lavorare, abbreviandolo tramite l’uso di AI generativa, apprendimento per dimostrazione (utilizzando anche a simulazione in parallelo).

Costo e ritorno economico: i cobot hanno un costo relativamente contenuto e quindi un rapido payback se si prendono in considerazioni applicazioni semplici. Gli AMR hanno costi legati alla singola unità che dipende molto dal tipo di prodotto, oltre al fatto che modelli RaaS per AMR sono già esistenti in molte realtà, proprio laddove ci sono aziende che preferiscono noleggiare il servizio pagando un canone ed evitando l’investimento iniziale e i costi di manutenzione. Arrivando agli humanoidi si trovano costi unitari ancora parecchio elevati e quindi difficili da giustificare economicamente; a questo proposito, le promesse che sembrano arrivare dalle case produttrici fanno riferimento a produzione in scala degli stessi humanoidi, fattore che significa riduzione dei costi di vendita a livelli molto inferiori a quelli attuali, rendendolo disponibile a realtà industriali diverse e aumentando quindi la curva di apprendimento, sia del robot che dell’utilizzatore finale. Il RaaS sembra quindi essere uno dei metodi più praticabili ad oggi: per fare un esempio, Agility non vende Digit, ma lo offre in servizio chiavi in mano; Figure e Apptronik sono orientate alla stessa strategia, producendo e fornendo i robot in progetti pilota con costi quindi condivisi, essendolo anche i benefici di questi progetti. Tutto questo, in attesa di una diminuzione dei costi unitari dei robot grazie alla famosa produzione in scala di essi. Va però detto che il TCO (Total Cost of Ownership) di un robot non è solo nel prezzo all’acquisto: conta la manutenzione, l’affidabilità (fermi macchina) e la vita utile. Un umanoide, con centinaia pezzi e componenti,

potrebbe necessitare di più manutenzione di un AMR semplice o di un cobot, incidendo quindi sulla voce Opex del conto economico. Per non dimenticare aspetti come la formazione del personale e l'adeguamento delle procedure di sicurezza, le quali possono aggiungere altre voci di costo all'adozione degli umanoidi.

Nel futuro gli umanoidi è probabile che non dovranno proprio rimpiazzare i robot tradizionali, ma dovranno piuttosto aggiungersi in maniera complementare ad essi: ponendo il focus quindi sull'importanza di individuare nicchie dove la forma umana del robot offre un vantaggio patico rispetto alle soluzioni esistenti.

4.1.2 Ragioni del focus sui robot umanoidi

Considerate le differenze appena discusse, può sorgere la domanda: in quali casi ha senso focalizzarsi sui robot umanoidi invece di impiegare cobot, AMR o altre soluzioni di automazione esistenti? Questa sezione analizza i criteri decisionali che possono motivare la scelta di un umanoide.

Adottare un robot umanoide, potendo risultare complesso e costoso, è giustificabile solo se fornisce benefici unici. Uno dei criteri che risultano più evidenti è la natura umano-centrica delle linee industriali di oggi. La presenza di strutture vincolanti che caratterizzano questi ambienti (scale, gradini, botole, angusti spazi di manovra) sono un forte caso a favore degli umanoidi. Allo stesso modo lo sono anche la presenza di strumenti e interfacce manuali come pulsantiere, utensili a mano, connettori da innesto, richiedendo spesso la destrezza e flessibilità di un braccio antropomorfo con mano. L'umanoide può usare, se ben progettato, gli stessi attrezzi di un operaio, non dovendo quindi sviluppare utensili specifici o modificare il pezzo o il metodo di lavorazioni o qualsiasi altra cosa solo per renderlo gestibile e utilizzabile da un robot. In poche parole, se si ha necessità di automatizzare un task svolto da un umano senza dover cambiare l'attività stessa, l'umanoide è la prima scelta.

Va considerata anche la variabilità del compito e dell'ambiente stesso come secondo criterio, perché se l'operazione da automatizzare è composta da molte varianti o decisioni contestuali, le soluzioni rigide fanno fatica. Da un cobot possono essere svolte più ricette, ma prima bisogna che esso venga riprogrammato e sensorizzato in modo accurato, per ogni variazione; in extremis un sistema tradizionale richiede addirittura la riprogettazione. Un umanoide, per come è ideato, se supportato da AI abbastanza evoluta, potrebbe invece passare da un compito all'altro facilmente, necessitando solo di un cambio di istruzioni ad alto livello, sfruttando quindi una combinazione perfetta tra flessibilità motoria e flessibilità di pensiero. Per riassumere, maggiore è l'incertezza e

la variabilità dei compiti, più è appetibile affidarsi ad una piattaforma generale che non ha bisogno di essere ricostruita da zero per ogni diverso scenario.

Connesso a tutto ciò c'è il concetto di retrofit e reingegnerizzazione. La maggior parte delle aziende preferisce utilizzare l'impianto attuale (brownfield) e introdurre innovazioni che si adattino ad esso, senza dover fare grosse modifiche strutturali (greenfield). Un cobot potrebbe prestarsi effettivamente in quest'ottica; infatti, mettendolo a fianco dell'operatore su una stazione manuale già esistente può migliorarne, come si è già visto, l'ergonomia, senza dover rifare da capo la stazione. Similmente, se non ancor di più, l'umanoide può essere utilizzato in reparti che già esistono dove lo spazio e il layout non sarebbero adatti per installazione di altri robot. La flessibilità intrinseca (già discussa) ha un ruolo centrale in questo: l'azienda ottiene un ROI decisamente più alto se l'umanoide può essere utilizzato e riutilizzato in mansioni e posizioni diverse, rispetto a dover acquistare e implementare soluzioni robotiche statiche diverse. Con questo si intende che ne beneficierebbe anche il time-to-value, soprattutto in contesti di produzione dinamica nei quali risulterebbe molto efficacie non dover aspettare lunghi tempi di deployment e set-up, bensì (magari attraverso un modello RaaS) l'umanoide sarebbe messo al lavoro in poche settimane su un'attività pilota, fatto adattare tramite un allenamento sul campo e poi riallocato ad altra attività una volta mutate le necessità.

L'ultimo fattore che verrà preso in considerazione in questa sezione è la questione ergonomica, proprio perché se pur alcune operazioni manuali rimangano difficili da automatizzare, restano usuranti o rischiose per gli operatori. Quando queste attività non portano logicamente a giustificare una cella robotica dedicata, per esempio per bassi volumi o varietà di pezzi, ma allo stesso tempo non possono essere eliminate, un umanoide subentra come soluzione. L'utilizzo di robot in mansioni 3D (Dirty, Dangerous, Difficult) è sempre stato uno delle motivazioni principali per automatizzare; quindi, aumentando gli humanoidi il numero di compiti 3D automatizzabili risultano perfetti, soprattutto per contesti industriali poco strutturati [94]. La tutela del lavoratore, quindi, non è solo un effetto collaterale positivo, ma proprio un criterio di scelta.

4.2 Lights-out factory e Dark factory

Definizione

Con lights-out factory si intende un sistema produttivo altamente automatizzato nel quale l'intervento umano è ridotto al minimo o addirittura assente, così da poter operare senza illuminazione continua e senza presidio umano [95], [96]. Detti anche dark factory, questi impianti contengono macchine che svolgono tutte le fasi produttive senza appunto l'impiego di operatori

umani in maniera diretta, così da mantenere una produzione 24/7, al buio [96], [97]. I due termini utilizzati sono solitamente intercambiabili; lights-out si concentra più sull'assenza di operatori a cui serve la luce, mentre dark factory mette in evidenza l'idea di stabilimenti funzionanti anche al buio, grazie ad un livello di automazione completa. In entrambi i casi si tratta del massimo grado di automazione industriale, quindi un paradigma che trasforma gli stabilimenti in sistemi autonomi intelligenti [95], [96].

Benefici principali

Le dark factories comportano una serie di benefici significativi riguardanti aspetti diversi della gestione strategica e produttiva di una azienda:

- **Aumento della produttività:** non ci sono più umani, quindi nemmeno pause e turni, arrivando così ad un'operatività ininterrotta, senza aumento del personale [98]. Le macchine idealmente sono capaci di lavorare 24/7 senza cali di prestazione, assicurando un maggior throughput produttivo rispetto all'alternativa umana [96], [97]. Ad esempio, Xiaomi ha una dark factory che produce circa 60 smartphone al minuto in funzionamento continuo, cioè circa 10 milioni di unità ogni anno senza alcun umano operante [97]. Questo significa praticamente ottenere un enorme vantaggio competitivo in termini di volumi e rapidità di risposta al mercato.
- **Efficienza nei costi operativi:** riducendone il bisogno, l'automazione completa riduce i costi riguardanti il personale (stipendi, formazione, oneri) oltre a risparmi consistenti in tutte le voci di costo ad essi indirettamente connessi, come le utilities e i servizi accessori. Questo perché uno stabilimento lights-out non ha bisogno di illuminazione, climatizzazione né altri supporti, permettendo un taglio consistente delle spese energetiche, e non solo [96], [99]. Oltre al fatto che non avere operatori in linea significa un decisivo abbassamento dei costi legati a infortuni e assicurazioni sul lavoro. Il tutto potenziato dal modello RaaS, che va incontro alle esigenze del cliente di trasformare le spese di Capex in Opex.
- **Qualità e consistenza produttiva:** è logico pensare che, con l'uso esteso di sistemi automatizzati e di AI nel processo di controllo qualità, si riesca a garantire prodotti più uniformi e soggetti a minor difettosità [98]. I robot sono precisi nella ripetizione, andando così ad eliminare la variabilità degli errori umani [96], [97]. Tramite la visione artificiale si ispeziona ogni pezzo in tempo reale, diminuendo gli scarti e le rilavorazioni. In generale si benefici si misurano in un miglioramento del livello qualitativo complessivo oltre a quello della tracciabilità del processo produttivo.

- **Sicurezza sul lavoro:** spostando gli operatori fuori dagli ambienti pericolosi, le fabbriche a luci spente migliorano drasticamente la sicurezza. I robot possono maneggiare materiali tossici, operare a temperature estreme o in spazi confinati senza rischi per le persone [96], [99]. Questo riduce enormemente gli infortuni sulle linee automatizzate e si prende cura della salute degli operatori, i quali sono sollevati dai compiti più usuranti o pericolosi.
- **Sostenibilità ambientale:** grazie all'ottimizzazione crescente e continua, che sfrutta i dati, aggiunta all'assenza di tutti quei servizi necessari per il personale, si ottiene una riduzione potenzialmente considerevole degli sprechi e dei consumi energetici non legati alla produzione. Tra questi risparmi ci sono quelli legati all'illuminazione e climatizzazione per ambienti di lavoro umani, così da ridurre l'impronta energetica dello stabilimento. Sempre grazie ad una migliore precisione, controllo qualità e riduzione della variabilità, ciò che ne deriva è una inferiore produzione di scarti. Va per correttezza tenuto a mente e citato il tema del ciclo di vita dei macchinari (smaltimento robot, consumo energetico data center, etc.), il quale può diventare un aspetto negativo sempre riguardo al tema della sostenibilità se non gestito e amministrato con approcci “green” per non vanificare i benefici ambientali [96].

Prerequisiti tecnologici

Il punto di partenza per la realizzazione di una dark factory sono le tecnologie dell'Industria 4.0, interconnesse tra loro coerentemente [95], [96]. Questo significa integrare:

- **Robotica avanzata e sistemi autonomi:** la dark factory deve funzionare senza l'operato diretto dell'uomo, e per questo serve la robotica avanzata industriale di nuova generazione come AMR/AGV e cobot collaborativi e i prodotti che ne “derivano”, capaci di svolgere operazioni ripetitive e complesse senza sosta [96], garantendo velocità e riproducibilità e andando quindi a sostituire l'uomo in molti compiti manuali lungo la linea.
- **AI e Machine Learning:** all'hardware deve aggiungersi il “software” ed è qui che si trovano algoritmi di AI e machine learning, apposta per orchestrare e gestire questi sistemi indipendenti e autonomi da connessi allo stesso tempo tra loro, capaci di prendere decisioni in tempo reale, regolare i processi e adattare la produzione alle condizioni variabili [96].
- **IIoT e sensori:** i sensori saranno distribuiti in maniera fitta e in modo da raccogliere il più possibile dati real time sullo stato della produzione delle apparecchiature e non solo, oltre ad andare a collegare i macchinari, le stazioni i lavoro e i sistemi di logistica [96]. Questi permettono il monitoraggio continuo del processo e la manutenzione predittiva, ossia la

capacità di anticipare guasti o necessità di intervento di diverso tipo, ottimizzando l'up-time generale della factory [96], [98].

- **Digital Twin e simulazione virtuale:** dopo aver già visto in precedenza cosa sia e a cosa serva questa tecnologia avanzata si può facilmente intuire come anche essa debba far parte dello scenario dark-factory. Esso, infatti, essendo la replica digitale dello stabilimento o di una linea, ne riceverà i dati per “poi” riprodurne il comportamento virtualmente [58]. Questo gemello digitale consente di simulare scenari produttivi, ottimizzare configurazioni e parametri, ed esercire la fabbrica reale con un controllo più fine. In una dark factory, i digital twin, insieme alle altre tecnologie citate, servono a monitorare in tempo reale, diagnostica da remoto e ottimizzazione continua dei processi senza l'intervento diretto dell'uomo in fabbrica [98], [100].
- **Cybersecurity e connettività sicura:** vista la mole di dati e il numero di strumentazione presente in fabbriche simili, il tema dell'esposizione a rischi informatici è all'ordine del giorno, rendendo quindi necessario predisporre robusti protocolli di cybersecurity contro attacchi hacker, manomissioni o malware, che potrebbero interrompere la produzione automatizzata e non solo [96]. La dark factory dovrà quindi essere caratterizzata anche dall'implementazione di protocolli di sicurezza, reti protette e controlli di accesso stringenti.

Casi di applicazione industriale

Il fenomeno “a luci spente” è ancora piuttosto raro ma ci sono alcuni esempi pionieristici di lights-out manufacturing che dimostrano il potenziale di questo modello industriale:

- **FANUC:** produttore giapponese di robotica che attorno al 2001 ha deciso di automatizzare interamente uno stabilimento industriale per la produzione dei suoi robot [98] potendo così parlare di “robot che costruiscono altri robot”. Nel suo impianto, che si trova ad Oshino, la factory opera in maniera autonoma, con una capacità di auto-replicazione del prodotto stesso di circa 50 unità al giorno (si intende 24 naturalmente, lavorando essa 24/7). Vengono gestite internamente anche le stesse attività di consegna componenti, assemblaggio, test di collaudo, imballaggio e stoccaggio dei robot prodotti [99]. L'affidabilità e l'uptime che riescono così a raggiungere sono estremamente alti, risultando uno dei primi esempi di fabbrica “dark” con successo.
- **Xiaomi:** nel 2023-24 l'azienda del mondo tech Xiaomi ha sviluppato a Pechino una factory per la produzione di smartphone di punta, in cui 81.000 m² di stabilimento, con un investimento di circa 330 milioni \$, sono ad oggi capaci di produrre dispositivi a un ritmo di 60 pezzi al

minuto, ovvero 10 milioni di smartphone ogni anno, completamente e solamente grafie a robotica avanzata e sistemi AI. Ciò rendere questo impianto di Xiaomi decisamente una dark factory. L'impianto infatti funziona 24/7 senza operatori, risultando di un'efficienza senza precedenti nel settore. L'obiettivo di Xiaomi era appunto quello di massimizzare produttività e qualità portando al minimo i costi operativi ed gli errori, cosa diventata possibile con la riduzione di interventi manuali, portando a zero difetti e variabilità [97].

- **ZTE:** sviluppato in collaborazione con Intel, l'impianto di manifattura lights-out di ZTE si occupa della produzione di apparecchiature di telecomunicazione (server). Per fare ciò, tutte le fasi, sono integrate grazie a tecnologie intelligenti e organizzate da un sistema centrale [100]. Sono naturalmente presenti sensori IIoT per la raccolta continua di dati chiave (temperature, throughput, conteggi di produzione, livello materiali in magazzino), i quali saranno sicuramente poi inviati ad una cloud edge platform che elabora le informazioni e ottimizza real time i flussi. Per l'individuazione di difettosità vengono impiegati algoritmi di deep learning e sistemi di visione 3D, andando così a ridurre del 20% i consumi energetici almeno in fase di collaudo. ZTE porta a casa risultati notevoli grazie a questi investimenti: difetti di assemblaggio -80%, tempi di consegna -48%, consumo energetico per ogni unità -10% [100].
- **Philips:** anche con Philips si trova uno scenario di automazione spinta. Nell'impianto di Drachten, struttura quasi completamente automatizzata, si svolge la produzione di rasoi elettrici, grazie all'utilizzo di circa 128 robot che permettono un output di 15 milioni di pezzi ogni anno. L'essere umano in questo caso è presente, ma solamente in alcune attività di controllo qualità a fine processo, e ciò nonostante anche la completa automazione di questa fase è in corso d'opera, tramite l'impiego di sofisticate camere AI autonome [99]. Il caso Philips permette di pensare al modello lights-out anche per prodotti di largo consumo, caratterizzati da volumi elevati e qualità costante [98].

Sfide tecnologiche, organizzative ed economiche

Si sono elencati i tanti benefici del realizzare una fabbrica lights-out ma bisogna anche guardare all'altra faccia della medaglia, dove si trovano sfide che le imprese devono affrontare sul piano tecnico, organizzativo ed economico:

- **Investimenti consistenti e scalabilità per PMI:** automatizzare a questi livelli richiede ingenti costi in termini finanziari ma anche a livello di tempo richiesto per l'integrazione e il tuning. Sono proprio questi alti costi a mettere in difficoltà le imprese, in particolare quelle più piccole (e medie) [96], [101]. Il rischio è che si venga a generare un divario ancora più evidente tra

grandi aziende capaci di permettersi dark factories e simili e PMI che rimangono ancorate e bloccate a soluzioni tradizionali, impattando la competitività del settore. Si deve valutare con attenzione il ROI già dai primi step dell'ideazione di questi investimenti e probabilmente valutare l'opzione di non fare tutto subito, quindi, di introdurre e integrare in maniera modulare e graduale così da diluire i costi [99].

- **Limiti tecnologici e affidabilità dei sistemi:** compiti particolarmente caratterizzati da problem-solving creativo o destrezza fine non sono facilmente automatizzabili e quindi non sempre affidabili alle macchine [96]. La maturità tecnologica dell'AI, nonostante sia in rapido sviluppo, non è ancora sufficiente a coprire il totale degli scenari. Se poi si considera che non devono esserci umani in linea, questo significa che i macchinari a cui si affida la completa autonomia della produzione debbano essere estremamente affidabili: guasti imprevisti in una dark factory possono fermare l'intera produzione se non sono gestiti adeguatamente, magari da sistemi di ripristino automatico.
- **Cybersecurity e vulnerabilità informatiche:** si è già parlato in precedenza della necessità di considerare nel progetto della factory anche protocolli di cyber sicurezza, proprio perché, tra i vari aspetti critici di questo scenario industriale high-tech ci sono i potenzialmente innumerevoli attacchi informatici, intrusioni malevole o malware che potrebbero bloccare l'impianto, sabotandolo o generando problemi di furto di proprietà intellettuale [96]. La sicurezza in questi casi è sicuramente un prerequisito, che può essere soddisfatto solo tramite l'implementazione di architetture ridondanti, sistemi di rilevamento delle intrusioni, crittografia dei dati e procedure per rispondere agli incidenti. È da tenere in considerazione anche che la dipendenza dal software e dalle reti implica che bug o downtime dei sistemi IT possano impattare direttamente la produzione.
- **Cambiamento organizzativo e competenze:** è difficile che per la realizzazione di una dark factory ci si possa affidare ad un modello brownfield; infatti, è molto più probabile che si parli di greenfield, con tutto ciò che comporta indirettamente anche a livello non strutturale. Si intende cioè che il personale esistente debba essere riqualificato per nuovi ruoli incentrati sulla supervisione degli impianti, sulla manutenzione specializzata dei robot e sull'analisi dei dati di produzione [95]. È responsabilità diretta del management quella di gestire la transizione senza far sì che si creino resistenze interne: bisogna attuare il cambiamento in maniera efficace per far sì che sia accettato e interiorizzato dai dipendenti, così da poterli valorizzare a livello di competenze nelle nuove mansioni che gli competeranno [102]. Quindi, è essenziale considerare all'interno della pianificazione anche la formazione continua, così come

l'attrazione di figure professionali nuove (ingegneri di robotica, data scientist, esperti di AI) spesso difficili da trovare [95], [101], [102].

- **Questioni regolatorie ed etiche:** la questione normativa ed etica è forse un tema più filosofico che tecnico, ma non per questo meno attuale o impellente, anzi. Le normative industriali e di sicurezza sul lavoro presenti ad oggi potrebbero dover essere riviste e aggiornate così da tenere in considerazione i nuovi impianti con assenza di operatori umani [96], [102].

4.3 Impatto sociale e lavorativo

Effetti sull'occupazione e trasformazione dei ruoli

La spinta ad automatizzare in questi termini, declinata nei vari modi ed elementi che abbiamo visto fa sorgere anche domande legate alla situazione occupazionale umana. Da una parte c'è la fobia della disoccupazione “sistematica” legata all'automazione dilagante dei processi produttivi: sostituendo i lavoratori con robot e sistemi AI, le aziende potrebbero ridurre drasticamente la domanda di manodopera umana in molti reparti produttivi [97], [101]. Ci sono studi che stimano che milioni di posti di lavoro nel settore manifatturiero per come lo conosciamo oggi possano essere cancellati dall'adozione di modelli dark factory o similari [96]. Si sta parlando principalmente di mansioni manuali, ripetitive e a basso valore aggiunto, ovvero le più facilmente automatizzabili. L'altra faccia della medaglia però considera, invece, proprio i nuovi posti di lavoro che si verrebbero a creare con queste implementazioni: i lavoratori verrebbero così riallocati verso compiti più qualificati. “Lights-out” in questo modo non significa "persone fuori" ma piuttosto, invece, che le persone si spostano verso ruoli come la supervisione dei sistemi, l'interpretazione dei dati e la promozione del miglioramento continuo in direzione di un futuro “uomo&macchina”, e non l'uno contro l'altro [98], [99], [102]. Le aziende sono quindi responsabili della formazione del personale all'utilizzo e gestione di robot e algoritmi, mentre dal fronte dei lavoratori deve esserci un riconoscimento riguardo all'importanza della formazione come accesso alle nuove mansioni che si verranno a creare in un mercato in rapida evoluzione [99], [97]. La sfida, quindi, risiede in questa transizione di ruoli, affinché sia socialmente sostenibile, evitando che la situazione si polarizzi diventando “vincenti-perdenti” nel mondo del lavoro [103].

Governance, implicazioni etiche e ruolo delle istituzioni

Si sollevano quindi importanti questioni etiche quando si parla di dark factory; perciò, è necessario un forte coordinamento con le istituzioni. Tra i primi aspetti, forse quelli più intuitivi e impattanti, c'è proprio quello della responsabilità e della sicurezza, argomento già presente nelle discussioni

sui veicoli autonomi. Questo deve essere un tema centrale proprio perché se negli impianti le decisioni verranno prese dall'AI, bisogna definire normative chiare riguardanti la responsabilità legata ad incidenti o di prodotti difettosi usciti da una dark factory. Bisognerà chiedersi se la responsabilità debba ricadere sul costruttore del software, dell'hardware o sull'azienda utilizzatrice. Ad oggi è ancora difficile per il legislatore tenere il passo di queste tecnologie, lasciando zone grigie sulla questione della tracciabilità delle decisioni e la validazione di processi gestiti da AI [96]. Gli enti giuridici che provano ad iniziare a rispondere questi quesiti dicono che la responsabilità, in caso di danno causato da un AI, dipende dalla situazione specifica: se è un difetto legato a scelte progettuali o a dati di addestramento sbagliati, allora è responsabilità principalmente degli sviluppatori; se invece deriva da installazione, manutenzione o supervisione, ricade sul costruttore del macchinario o sull'azienda utilizzatrice, in base al contratto stipulato. Non essendoci regolamentazioni ad-hoc, nei contratti e nelle polizze assicurative, ad oggi, si ripartisce il rischio tra tutte le parti coinvolte [104].

Il secondo aspetto ha carattere maggiormente politico e sociale visto che riguarda la tutela dei lavoratori e il rischio di perdita dei posti di lavoro. Naturalmente, imprese e parti sociali devono lavorare in sinergia per accompagnare la transizione. Tra i vari elementi da prendere in considerazione bisogna aggiungere il fatto che tutto questa corsa all'automazione è contestualizzata per il suo aspetto regionale e industriale, dove la mancanza di lavoratori per certe mansioni è data da un insieme complesso di fattori di tipo politico, economico e sociale. La verità è che la filiera produttiva dovrà presto trasformarsi, tramite l'automazione di interi segmenti della value chain, costringendo l'uomo a ridefinire il suo posto come attore in questo nuovo scenario, cogliendo le opportunità tecnologiche che si presentano anziché subirle. Si rivelerà di conseguenza indispensabile l'integrazione di criteri ESG (ambientali, sociali e di governance) in tutto il processo, per garantire che gli standard etici siano correttamente rispettati. Solo un'azione sinergica dei fattori e delle entità appena discusse può far sì che si eviti che l'economia corra più veloce della società producendo effetti negativi come inequità e divisione sociale [96].

PMI vs grandi imprese: impatti differenziati

Il fenomeno delle dark factory potrebbe accentuare ancora di più il divario tra PMI e grandi aziende più che altro per una questione di capacità di finanziamento; infatti, le grandi imprese dispongono di capitali e competenze per investire massicciamente in automazione riuscendo ad ottenere vantaggi di costo, di produttività e una maggiore resilienza operativa. Dall'altra parte ci sono le PMI che potrebbero non riuscire a rimanere competitive per mancanza di risorse necessarie al

finanziamento di progetti di transizione tecnologica di questo tipo. Come già menzionato, i costi infrastrutturali di sviluppo dei componenti di una dark factory sono quasi impossibili per realtà di dimensioni minori [96]. Questo potrebbe significare che chi già era veloce su queste innovazioni, lo sarà ancora di più e chi era lento, resterà tale, a meno di interventi mirati come possono per esempio essere consorzi tecnologici, piattaforme condivise o incentivi pubblici per la transizione digitale. Questa polarizzazione delle aziende, in base alla loro dimensione e capacità di finanziamento e quindi investimento trova corrispondenza anche a livello geografico: dove la presenza di multinazionali tecnologiche in una regione è alta si assisterà, potenzialmente ad un maggior sviluppo di dark factory, mentre, al contrario luoghi caratterizzati maggiormente da PMI potrebbero beneficiarne meno, almeno in fase iniziale, con possibili impatti sullo sviluppo regionale. D'altra parte, in realtà, l'automazione potrebbe offrire anche opportunità anche alle PMI in certe nicchie, se si considera soluzioni modulare e indipendenti dall'infrastruttura come gli umanoidi: essi permetterebbero di automatizzare in maniera incrementale, senza dover passare ad una modalità greenfield, proprio grazie alle capacità e caratteristiche intrinseche dell'umanoide.

Rischi e opportunità macroeconomiche e territoriali

Macroscopicamente, la diffusione di questo nuovo paradigma di fabbriche porta con sé opportunità, come l'aumento della produttività complessiva di un Paese, sostenendone la crescita economica. Se una nazione (o regione) prenderà in considerazione queste evoluzioni tecnologiche sarà capace di mantenere capacità manifatturiere di alto livello anche di fronte ai problemi di oggi come l'aumento dei costi, senza dover affrontare le questioni di delocalizzazione delle imprese in paesi a bassi costi. Questa spinta ad innovare può rafforzare i settori locali e creare nuovi ecosistemi industriali lungo la catena del valore (fornitori di prodotti e servizi) generando occupazione qualificata in maniera indiretta ma efficace. Come ulteriore conseguenza di questi fenomeni ci sono i potenziali incrementi di PIL e vantaggi economici in generale (banalmente maggior potere contrattuale o miglior reputazione) grazie a una maggiore efficienza e qualità dei prodotti. La Cina è sicuramente un esempio a questo proposito, per come sta puntando sulle lights-out factory in modo da dimostrare la sua competitività industriale nazionale [100].

Tra i rischi presenti non può non essere menzionato anche quello di natura maggiormente macroeconomica, per il quale diviene necessario accompagnare l'automazione con adeguate politiche di redistribuzione e impiego, per non incappare nel famoso effetto polarizzazione economica, di cui già in precedenza discusso, e che in questo caso prenderebbe un carattere regionale: le aree automatizzate prosperano e le altre possono subire stagnazione economica e

disoccupazione sistemica [96]. Questo fenomeno potrebbe portare ad un circolo vizioso di contrazione economica: dopotutto, minor occupazione significa meno consumi che a loro volta porta a minor produzione, e così via. Rimane aperto come grande argomento dibattito questo in cui si sostiene che a seguito di automazione ci sia una domanda in calo e addirittura insufficiente. L'intervento pubblico, si capisce, diventa fondamentale. Il ruolo che esso ha potrebbe essere declinato in attività come investimenti nella formazione dei lavoratori, sostegno alla transizione dell'occupazione e istituzione di nuove forme di protezione sociale.

4.4 Focus settoriale su Piemonte, Lombardia ed Emilia-Romagna

Analisi del potenziale degli umanoidi nei settori principali di Piemonte, Lombardia ed Emilia-Romagna.

Qui si esamineranno le potenziali applicazioni dell'umanoide dei settori chiavi delle principali regioni industriali italiane, in base alla regione, in modo da mettere in evidenza sfide e opportunità tecnologiche, organizzative ed economiche. Partendo dal presupposto che gli umanoidi sono una tecnologia di frontiera, emergenti sia nel capo industriale che quello dei servizi (sanità e retail, per esempio). Per quanto riguarda in particolare le fabbriche e le imprese italiane, la tecnologia umanoide è ancora nelle fasi iniziali, ma sta rapidamente evolvendo grazie ai progressi nell'AI, negli attuatori meccanici e nella sensoristica generale [105]. Di seguito si analizzano i principali settori regionali italiani, cercando di dare una valutazione sui possibili impieghi di umanoidi, le relative opportunità e criticità.

Piemonte: automotive e aerospazio volano per i robot umanoidi

Il Piemonte vede nell'automotive e nell'aerospazio i suoi settori principali e trainanti, perché sono caratterizzati da produzioni complesse, ad alto contenuto ingegneristico e con fabbisogni di automazione elevati. La presenza di stabilimenti finali, come Stellantis a Mirafiori, per quanto riguarda l'automotive, e centri per la progettazione, oltre alla presenza di una svariata cifra di fornitori di componenti, porta a una serie di opportunità significative per l'introduzione di umanoidi in produzione. I processi di assemblaggio automobilistico conoscono già un'automazione di un certo tipo grazie alla presenza di robot industriali tradizionali nelle stazioni fisse. È così che gli umanoidi potrebbero inserirsi, ad esempio, nella logistica interna di linea (nel rifornimento di componenti), nell'assemblaggio finale di parti o per la manutenzione predittiva degli impianti, riuscendo ad intervenire laddove i robot fissi o su rotaia non arrivano. Si arriva all'aerospaziale e aeronautico, dove il Piemonte eccelle, ospitandone gran parte dell'intera industria nazionale; per questo motivo questa regione offre casi d'uso peculiari. In produzione, un

umanoide sarebbe capace di svolgere interventi in spazi ristretti come le fusoliere, maneggiare componenti delicati con destrezza umana ma maggior forza e precisione. L’assemblaggio di satelliti o strumenti spaziali, essendo piccole serie che richiedono flessibilità, è perfetto per gli humanoidi, grazie alla loro visione artificiale e controllo raffinato; potrebbero assistere i tecnici, riducendo i tempi di integrazione e riducendo gli errori.

Proseguendo con i potenziali impieghi humanoidi si arriva a quello nella manutenzione di impianti industriali complessi (banchi prova motori, ad esempio) dove un robot umanoide potrebbe operare con valvole, pulsanti, strumenti diagnostici a misura d'uomo. Le opportunità tecnologiche per il Piemonte sono quindi elevate e perfettamente adatte alle caratteristiche tipiche di un umanoide; perciò, si potrebbe aumentare la versatilità dei sistemi produttivi, partendo dalle linee rigide a cellule riconfigurabili ma applicandogli gli humanoidi.

Dal punto di vista economico, il Piemonte ne guadagnerebbe solamente, grazie alla capacità di questa tecnologia di alleviare il problema dell’invecchiamento della forza lavoro manifatturiera e dello scarso ricambio generazionale. Essi sono infatti versatili e in grado di rimpiazzare o supportare operatori in questi compiti ripetitivi o usuranti offrendo continuità operativa alle aziende del territorio Piemontese [57]. La sfida economica principale è ancora il costo ancora elevato di questi robot: a questo proposito le PMI piemontesi dovranno valutare attentamente il ROI, probabilmente iniziando con progetti pilota cofinanziati per poi scalare l’implementazione. Con i seguenti capitoli si cercherà proprio di fornire uno scenario esemplificativo che possa aiutare nelle valutazioni di investimento in questo senso.

In sintesi, il Piemonte, grazie al suo ecosistema industriale avanzato è un terreno perfettamente fertile per adottare precocemente robot humanoidi in contesti produttivi complessi traendone potenzialmente grandi vantaggi.

Lombardia: produzione manifatturiera diffusa e prime sperimentazioni di humanoidi

La Lombardia, con i suoi molti settori industriali, metalmeccanica, chimica, alimentare, fashion, pone le basi per una svariata serie di interessanti progetti pilota potenziali, soprattutto nelle attività logistiche e di processo.

Ne fa da esempio concreto proprio una realtà tutta lombarda: la startup Oversonic Robotics di Carate Brianza (MB) ha creato RoBee, primo robot umanoide cognitivo siglato made in Italy e ideato per lavorare sia in contesti industriali che sanitari [106]. RoBee (altezza 1,85 m, 120 kg) è utilizzato già oggi in maniera sperimentale in alcune fabbriche lombarde e ospedali, con una lista

di circa 60 casi d'uso [106]. È capace di interagire con macchinari e postazioni esistenti portando a termine compiti come il rifornimento di linee, il trasporto di materiali con carrelli e l'assemblaggio di parti in collaborazione con operatori [106]. Essendo estremamente flessibile a livello cognitivo e capaci di comunicare in maniera avanzata è possibile inserirlo in un team di lavoro umano senza dover riprogettare completamente i flussi: riceve comandi con istruzioni vocali o via tablet e passa da un task a un altro a seconda delle esigenze della giornata.

Naturalmente utili in logistica interna, montaggio e manipolazione, gli umanoidi potrebbero altresì essere applicati in aziende di assemblaggio elettroniche, dove potrebbero sfruttarsi le loro destrezza manuale nell'inserire componenti su linee semi-automatiche, senza rischiare l'affaticamento. Pure nel tessile-moda, settore storico di questa regione, sono impiegabili, per esempio, nella movimentazione di rotoli di tessuto, nel carico/scarico di macchine tessili, come assistenti alla vendita in showroom. In principio, in questi ambienti e realtà industriali l'automazione è stata limitata, per via della delicatezza dei materiali, la variabilità dei processi e modelli; però oggi sappiamo che con il livello che si inizia a raggiungere dagli umanoidi, si potrebbe programmarne di particolarmente delicati e precisi in modo che si occupino di operazioni come il taglio di tessuti o il confezionamento di capi d'abbigliamento, collaborando con sarti e operatori. Nel settore alimentare della Lombardia l'applicazione umanoide potrebbe riguardare situazioni come la gestione del confezionamento di fine linea, movimentazione di ingredienti o composti pesanti, così da ridurre il rischio potendo essere esposti ad ambienti industriali pericolosi (e.g. ambienti sanificati).

Se si guarda alla readiness tecnologica di questa regione si può trovare un primo riscontro in un forte network di ricerca (Politecnico di Milano, centri CNR, IIT Milano). Ci sono già progetti pilota con umanoidi sostenuti da collaborazioni pubblico-private: infatti, il Competence Center MADE a Milano ha soluzioni dimostrative di smart factory che includono robot bipedi integrati con sistemi IoT e AI, messi a disposizione delle imprese per testare la loro applicabilità. A fare i primi esperimenti tra robot collaborativi e i primi umanoidi ci sono anche aziende storiche per quanto riguarda la robotica, ABB a Vittuone ne è un esempio. In Lombardia molte fabbriche hanno già a disposizione e utilizzano AGV/AMR per la logistica e di bracci robotici fissi; quindi, l'umanoide potrebbe essere inserito in un ambiente brownfield. Da un punto di vista organizzativo, si è già discusso come sia un aspetto fondamentale quello della gestione della coabitazione uomo-umanoide; quindi, anche in questo caso sarà un punto focale delle varie integrazioni. Ciò nonostante, ci sono tracce già di prime applicazioni umanoidi principalmente in contesti di servizio

a Milano in cui i robot assistono per fornire informazioni ai clienti, e in campo sanitario lombardo si testano umanoidi come supporto in terapia e diagnostica [106]. Queste realtà dimostrano come inizi a definirsi una sorta di apertura generale nei confronti di queste tecnologie, questo anche grazie alla forte base manifatturiera lombarda e la maggiore dimensione media delle imprese rispetto alla media nazionale, implicando risorse finanziarie più consistenti per investimenti in tecnologie emergenti. Va considerato che la Regione Lombardia e il governo offrono incentivi (credito d'imposta 4.0, bandi POR FESR) che diverse imprese stanno effettivamente utilizzando per progetti pilota di automazione avanzata [57]. Questo contesto mostra una Lombardia piuttosto pronta come territorio di partenza per tentare l'integrazione di umanoidi.

Emilia-Romagna: il potenziale dei robot umanoidi nella “Motor & Packaging Valley”

Proprio per via dei suoi distretti ad alta specializzazione e orientati all'automazione, l'Emilia-Romagna diventa un terreno fertile di sperimentazione per i robot umanoidi, a partire dai settori motoristici e delle macchine automatiche. Questa è la terra dove si producono veicoli sportivi, motocicli e componenti ad alte prestazioni, dove quindi l'adozione di robotica avanzata è già piuttosto alta in combinazione con abilità artigianali importanti per garantire qualità e precisione. Gli umanoidi potrebbero essere impiegati quindi per ampliare ulteriormente la flessibilità produttiva, come nella produzione di auto sportive a basso volume ma alta personalizzazione (Ferrari, Lamborghini), occupandosi di assemblare parti dell'interno vettura o fare test diagnostici dinamici su vetture in movimento lungo la linea, adattandosi in maniera versatile. Si prosegue ipotizzando applicazioni come la prototipazione e testing (aspetti tipici del motor racing di Dallara, team corse), esecuzione di cicli di prova in ambienti climatici ostili per via, ad esempio, di alte temperature e vibrazioni. Non da meno sarebbe il successo dell'impiego dell'umanoide anche nel settore dei motori industriali e agricoli (CNH Industrial ha impianti motori a Modena) dove potrebbe essere utilizzato un antropomorfo per test o assemblaggi in isole flessibili, riducendo il tempo di set-up tra le varie varianti di prodotto.

Rimanendo in Emilia non si può non considerare il packaging (Packaging Valley con IMA, Marchesini, etc.), settore dove l'introduzione di umanoidi sarebbe uno showcase perfetto anche da un punto di vista commerciale: la dimostrazione dell'impiego di umanoidi nelle fabbriche costruttrici di macchine automatiche fornirebbe un esempio concreto ai clienti sull'introduzione di queste tecnologie nel mondo industriale e non solo. Guardando ora dal lato degli utilizzatori finali delle macchine automatiche (per esempio, impianti di confezionamento alimentare e

farmaceutico), gli umanoidi operatori potrebbero essere i responsabili dell'alimentazione, dell'intervento per cambi formato e manutenzioni rapide.

In Emilia in particolare, ma in Italia in generale, è tipico e frequente trovare PMI distrettuali, come il tessile-abbigliamento a Carpi o l'agroalimentare. In questi contesti, gli umanoidi potrebbero essere di supporto alle le piccole aziende automatizzando dove è difficile farlo in maniera tradizionale a causa della varietà di prodotti artigianali, giovando a distretti eterogenei. Va anche detto che l'Emilia-Romagna ha a sua disposizione un ecosistema molto solido tra imprese e ricerca (Università di Bologna, centri CINECA, ART-ER) andando così a risultare relativamente più facile il realizzare progetti sperimentalni andando a coinvolgere più realtà imprenditoriali, andando, per esempio, a creare progetti pilota a livello di consorzio. Questo approccio tramite collaborazione andrebbe di sicuro a diluire i costi permettendo di valutare l'impatto umanoide a minor rischio.

Un'altra opportunità è la forte cultura emiliano-romagnola di automazione, vista come base di know-how che dovrebbe facilitare l'integrazione di robotica avanzata: aziende locali ma con strutture anche internazionali come Technogym, oppure GD per packaging potrebbero rapidamente adattare le proprie soluzioni produttive ai nuovi umanoidi, creando una filiera locale (ad oggi il 62,6% del fatturato nazionale di macchinari per il packaging è generato in Emilia [54], a riprova di un know-how unico potenzialmente capace di essere trasferito agli umanoidi destinati a quei macchinari stessi). Le sfide tecnologiche rimangono molteplici e riguardano principalmente l'affidabilità e la sicurezza ma su questo aspetto, l'Emilia può sfruttare esperienze come, ad esempio, quella del laboratorio Ilab di IMB (Bologna) ha già certificando algoritmi di sicurezza per cobot, i quali potrebbero essere estesi poi anche agli umanoidi.

Le sfide organizzative dell'Emilia-Romagna coincidono in gran parte con quelle già discusse: preparare l'essere umano, ognuno secondo il suo ruolo, all'interazione con le novità robotiche, gestire le sensibilità riguardanti il fenomeno di sostituzione del lavoro umano. In buona parte delle PMI di questa regione, infatti, c'è un forte legame con la lavorazione artigianale del prodotto. In termini economici, l'Emilia-Romagna dovrebbe vedere gli umanoidi come una possibilità di aumento/mantenimento della produttività senza dover delocalizzare l'azienda (discorso valido poi anche per le altre regioni), mantenendo la produzione localmente e quindi il valore aggiunto nella stessa Emilia-Romagna.

5. Caso applicativo

In questa sezione si svilupperà un caso applicativo riguardante l'ipotesi di introduzione di un robot umanoide in una linea di assemblaggio generica tipo, produttrice di componenti elettromeccanici presso una PMI manifatturiera italiana. Si partirà a descrivere il contesto aziendale e lo scenario as-is, per poi tentare di delineare lo scenario to-be con l'integrazione di un umanoide collaborativo. Poi i due scenari saranno confrontati in termini quantitativi e qualitativi, concludendo con la stima del ROI.

5.1 Contesto aziendale e processo AS-IS

L'azienda in esempio è una PMI italiana del settore elettromeccanico che produce piccoli motori elettrici ad uso industriale e civile. Si tratta di un segmento manifatturiero fac-simile piuttosto rappresentativo del tessuto industriale nazionale, con lotti medio-piccoli e molte varianti di prodotto [107]. Nell'impianto produttivo è presente una linea di assemblaggio manuale con postazioni in serie, ciò significa che ogni motore viene realizzato attraverso fasi in sequenza tra loro [108]. Il layout della linea ha una disposizione ad U, cinque postazioni con un addetto l'una, i quali hanno compiti specializzati e ripetitivi [109]. I tipi di modelli prodotti sono vari, perciò, fino ad oggi è stato difficile pensare di automatizzare i processi, oltre al fatto che la linea si basa sulla flessibilità del lavoro umano, intaccando però così l'efficienza.

La situazione as-is è caratterizzata dalla linea che opera su *due turni al giorno* (mattina e pomeriggio) di *8 ore* l'uno [110]. Ogni turno ha 5 operatori in linea, uno per ogni stazione, un addetto al collaudo finale e un supervisore di reparto, contando circa *12 addetti complessivi*. I tempi ciclo si aggirano intorno ai circa *8-10 minuti* di tempo, necessario per il totale assemblaggio del motore, considerando le 5 stazioni) [111]; questo porta ad una capacità produttiva di circa *6-7 pezzi/ora*, corrispondente a circa *100 unità per turno* a massima efficienza. Annualmente si è intorno i *40-50 mila pezzi*. La mansione tipo del lavoratore è caratterizzata da carico intenso, centinaia di micro-operazioni al giorno (e.g. inserimento componenti, avvitature, movimentazioni), alto livello di ripetitività e scarsa ergonomia. Una serie di studi e casi reali riportano configurazioni e organizzazione produttive simili.

Organizzazione del lavoro e produttività

Si può inquadrare gli operatori come operai metalmeccanici con un grado di specializzazione di medio livello. Il costo del lavoro è probabilmente una delle voci che più incide: i costi di settore per queste mansioni si aggira intorno a *20-25 €/h* (circa *33-38 k€/anno* per dipendente a tempo

pieno) [112]. Questo vuol dire che 5 addetti per le postazioni, ogni turno, costano all'azienda annualmente $330\text{-}380\text{ k}\epsilon$ senza andare a considerare altri costi indiretti.

Volumi, qualità e pain points

Per quanto riguarda il controllo qualità, in questo scenario, ci si affida ancora a controlli manuali e verifiche a fine linea. C'è una verifica da parte di un operatore su ogni motore prodotto, che consiste in prove di funzionamento ed ispezioni visive. Questa modalità non riesce ad eliminare del tutto gli errori dell'operatore umano; infatti, studi a questo proposito spiegano come gran parte dei difetti in produzione derivino da errori o sviste degli operatori raggiungendo tassi anche dell'80% rispetto ai difetti del manifatturiero [113]. Secondo un'altra fonte, in particolare sull'assemblaggio elettronico, il 18% dei prodotti difettosi sarebbero imputabili direttamente ad errori degli operatori di linea [114]. Ciò che ne deriva sono scarti, rilavorazioni e costi che possono arrivare ad incidere con valori tra 5% e il 30% dei costi di produzione [113].

Nell'esempio in corso si assumono tassi di difettosità considerati comunque contenuti (qualche punto percentuale), assumendo una certa esperienza degli operatori e una relativamente bassa complessità dell'output. Ispezionare visivamente in maniera manuale non garantisce il tracciamento e il conteggio al 100% di tutti i difetti.

Confindustria indica riguardo il 2023 un tasso medio di assenteismo del 6,2% nel manifatturiero, valore in crescita per i compiti manuali pesanti e nelle aziende più grandi. Nel nostro scenario si assume un tasso del 4-5%, in linea con la media delle piccole imprese (considerando 50 dipendenti in azienda) [115]. Continuando nel considerare le varie criticità bisogna citare quella del turnover del personale, valore di settore che in Italia registra tassi intorno al 25% ogni anno [14]. Questo può portare a nient'altro che ulteriori costi di reclutamento e formazione che è importante menzionare, nonostante sia complesso quantificarli. Questo turnover impatta sulla continuità produttiva sia sulla qualità, dovendo il nuovo personale essere formato prima di potersi definire autonomo.

Un ulteriore pain point è la rigidità del processo manuale in termini di costi e capacità: l'azienda fatica ad aumentare la produzione senza una crescita quasi lineare dei costi di manodopera. La rigidità del processo manuale porta a sua volta alla scomoda situazione nella quale per aumentare la produzione servono costi linearmente proporzionali, con bilancio quindi nullo. L'unica strada che rimane per aumentare l'output di produzione sarebbe quindi aggiungere il terzo turno o aumentare gli straordinari, incidendo ancora sui costi e sulla logistica. L'azienda in esempio ha finora evitato di scegliere un'automazione a postazioni fisse e specializzate visto, come in

precedenza detto, il livello di variabilità del prodotto e del processo, oltre al fatto che avrebbe significato investimenti molto corposi senza ottenere un reale beneficio in flessibilità. Questo vincolo è, in realtà, abbastanza comune a molte PMI, proprio perché fino a pochi anni fa automatizzare sembrava significare ingessare i processi produttivi, incompatibilmente con lotti medio-piccoli o con cambi frequenti.

Di seguito si vedrà un'ipotesi di scenario TO-BE che integra l'umanoide come soluzione alle criticità appena viste.

5.2 Scenario TO-BE con introduzione del robot umanoide

Seguendo la traccia di Figure 02, Digit e Apollo (rispettivamente di Figure, Agility Robotics e Apptronik), si prova a sviluppare un bozzetto dell'umanoide che potrebbe operare nella PMI sviluppata appositamente per lo scenario ipotetico. Questi sistemi possiedono dimensioni e forza nell'ordine di grandezza di un essere umano, progettati per operare anche in ambienti brownfield, capaci di sollevare fino a 25 kg e posizionare con elevata precisione (Figure 02) [116], mani antropomorfe con forza di presa simile a quella umana, deambulazione su due gambe. Alle capacità appena citate si aggiungono un'autonomia energetica (per ogni carica) di circa cinque, capacità di comunicazione vocale, elevata capacità di visione e coordinazione (algoritmi di AI per riconoscere l'ambiente e gli oggetti [116]). Seguono con prestazioni simili (di poco migliori o peggiori) Digit e Apollo [117].

Configurazione del sistema e attività automatizzate

Nel TO-BE, si considera che l'azienda “assuma” *un* umanoide in linea attraverso un approccio “plug-and-play” e mirato a minimizzare le modifiche all’impianto esistente (brownfield). Il robot viene assegnato alle attività più adatte alle sue capacità e più gravose/critiche per gli operatori umani. L’umanoide viene assegnato a tre mansioni target principali, in modo da automatizzarne alcune parzialmente e altre completamente:

- **Movimentazione e carico di parti pesanti:** l’umanoide preleva componenti grandi e/o pesanti (come, per esempio, la carcassa del motore, pacchi di statori, rotori assemblati) da banchi pallet o carrelli e li posiziona opportunamente sulla linea. Prima il compito era svolto dagli operatori in maniera manuale o con ausilio di paranchi, mentre adesso il robot riesce a gestirli con disinvoltura grazie ai suoi arti robusti.
- **Operazioni di assemblaggio ripetitive:** l'avvitatura dei bulloni di chiusura del motore è una di quelle attività in cui verrebbe impiegato l'umanoide, proprio per via delle

caratteristiche del compito ossia destrezza richiesta e ripetitività. Fino a prima dell'inserimento del robot c'era un operatore che doveva avvitare manualmente 4-6 viti per ogni pezzo, usando un avvitatore pneumatico, per decine di volte l'ora. L'umanoide invece può addirittura essere direttamente dotato di un utensile avvitatore ad inserto compatibile con le sue mani robotiche. Proprio usando i suoi sistemi di visione può verificare se i fori sono presenti e dove sono, in modo poi da inserire le viti, concludendo serrandole con precisione costante, senza bisogno di tool ulteriori. In questo modo si ottiene che l'operatore è sollevato dal compito monotono di avvitatura e una qualità uniforme del serraggio.

- **Ispezione qualitativa e controllo finale:** essendo l'umanoide dotato della capacità di visione artificiale, per quanto riguarda l'ispezione visiva, analisi delle non-conformità, assistenza nel test finale alcune fasi di controllo qualità, può essere responsabile di queste attività, riducendo il carico per l'operatore di collaudo e velocizzando il ciclo di test, oltre ad aumentarne la precisione.

Queste attività in particolare permettono un'automazione efficacie pur agendo in un contesto brownfield e quindi nel quale si richiede siano fatte il minimo numero di modifiche. Nel caso d'uso in esame si prevedono solo adattamenti periferici, come possono essere marker visivi, o simili, installati per quanto riguarda la facilitazione della visione artificiale, e invece la programmazione del software del robot affinché possa integrarsi col flusso produttivo (sequenze di lavoro sincronizzate col takt-time della linea). Quindi, l'approccio scelto è il "retrofit", evitando costose modifiche strutturali dell'impianto.

Interazione con gli operatori umani e sicurezza

Nel TO-BE la linea diventa un ambiente di lavoro ibrido: quattro stazioni gestite dagli operatori umani e una stazione (o insieme di compiti) gestita dall'umanoide. La coordinazione tra i due tipi è fondamentale. Il robot è rifornito di sensori anticollisione e logiche collaborative così da garantire la sicurezza senza bisogno di barriere fisiche (norme ISO/TS 15066 sulla robotica collaborativa) [118]. Gli operatori, d'altra parte, devono essere formati per lavorare insieme al nuovo collega, sapendoci interagire e conoscendo la procedura, ad esempio, per richiedere un intervento manuale se necessario.

La sinergia che viene a crearsi tra umani e robot riduce i tempi morti e migliora il flusso. In ultimo, è importante, come precedentemente spiegato, che si coinvolga il personale nel progetto, spiegando come esso non sia lì per rimpiazzare i lavoratori, bensì supportarli. Un sondaggio

internazionale, infatti, ha rilevato che il 57% dei produttori globali vede i robot come aiuto al lavoro degli operatori e non come sostituti di essi [116].

Impatto sui KPI: produttività, disponibilità, ergonomia e qualità.

Lo scenario TO-BE vuole ottenere miglioramenti in diversi aspetti prestazionali:

- **Aumento di produttività e capacità:** le pause e il recupero non è necessario all'umanoide, così si riducono i micro-fermi, andando a mantenere il ritmo produttivo impostato dalla produzione. L'azienda, inoltre, adesso può potenzialmente estendere l'orario di lavoro senza ricorrere a straordinari o a terzi turni degli operatori: il robot dopotutto è disponibile 24/7 e gli si potrebbe quindi affidare, per esempio, lavorazioni di pre-assemblaggio. In prospettiva, con più umanoidi si potrebbero organizzare anche veri e propri turni H24 del tutto automatizzati. Rimane il fatto che già con 2 turni tradizionali alimentati dal supporto degli umanoidi, si può fare una stima di incremento della produttività del +5-20% per via della riduzione della quantità di tempo non produttivo [119], [120]. Se poi, come si ipotizzava precedentemente, si aggiunge il robot in corrispondenza di una fascia oraria extra, come potrebbe essere quella di, per esempio, 4 ore in più a fine giornata, la produttività potrebbe salire fino addirittura al +50% rispetto allo scenario AS-IS [121], [122].
- **Miglioramento della qualità e riduzione difetti:** andando ad eseguire in maniera automatizzata i compiti ripetitivi si può ridurre di molto il numero di errori dovuti alla fatica o alla distrazione umana. In generale, complessivamente ci si aspetta che difetti di assemblaggio e non-conformità diminuiscano fortemente, fino al 40% [123]. Questo si traduce in minor scarti e rilavorazioni, quindi a sua volta risparmi economici e miglior soddisfazione lato cliente. Se poi ci si pensa, i dati di qualità raccolti dalla sensoristica umanoide possono essere utilizzati per analisi statistiche e miglioramento continuo.
- **Benefici ergonomici e di sicurezza:** il risultato forse più immediato e subito tangibile è il sollievo dato dal fatto che gli operatori sono sollevati dai compiti pesanti. Nel caso ipotizzato questo si concretizza con l'operatore della stazione 1 che non deve più sollevare 200 carcasse di motore ogni giorno e quello della stazione successiva avvitare 300 viti: il beneficio in termini di salute sul lungo periodo è rilevante.

In conclusione, lo scenario TO-BE dipinge una linea semi-automatizzata con l'umanoide che funge da jolly apportando flessibilità in compiti come l'handling, il montaggio e il controllo. Si viene ad ottenere un sistema produttivo più robusto, intelligente e resiliente. Si noti che tutti e cinque gli

aspetti prestazionali (produttività, disponibilità, ergonomia, qualità, flessibilità) alla fine, mostrano miglioramenti, riuscendo così ad affrontare, anche solo parzialmente, i pain points dell'AS-IS.

5.3 Analisi comparativa AS-IS vs TO-BE

Verrà riassunto ora tramite una valutazione dei principi di performance, l'impatto complessivo dell'introduzione del robot umanoide. La Tabella 1 riassume i parametri chiave:

Indicatore	Scenario AS-IS	Scenario TO-BE (con umanoide)
Personale in linea	5 operatori/turno × 2 turni = 10 operatori	4 operatori/turno + 1 robot × 2 turni = 8 operatori + 1 robot <i>(Nota: robot sostituisce 1 operatore per turno)</i>
Ore operative/giorno	16 ore (2×8h, senza turno notte)	16 ore (2 turni) + potenziale estensione extra (fino a 4-8h aggiuntive con robot) = 16-24 ore totali disponibili
Produzione giornaliera	200 pezzi/giorno (2 turni)	230 pezzi/giorno (stessi 2 turni, efficienza migliorata del 15%) fino a 300 pezzi/giorno con turno extra robotizzato (capacità +50%)
Tempo ciclo per pezzo	10 min (variabilità umana, pause incluse) 2% (errori di assemblaggio umani presenti)	9 min effettivi (robot elimina micro-pause, ritmo costante)
Tasso difetti (scarti)		1% (errori ridotti da automazione e visione) [123]
Indice OEE (efficienza impianto)	60-70% (perdite da fermate, qualità)	80-90% (meno fermi e difetti, 1/3 turni) [124]
Costo manodopera diretto	350 k€/anno (10 operatori)	280 k€/anno (8 operatori, risparmio circa del 20%)
Costo operativo robot	/	Energia + manutenzione robot 6-14k €/anno (stima 5-12% costo investimento) [125]
Investimento iniziale	/	115 k€ acquisto robot + 50k € integrazione iniziale (una tantum) [126], [127], [128] <i>(Nota: 115 k€ è un valor medio delle fonti, convertito in €. Tuttavia, sovrastimato in base al trend in rapida decrescita)</i>
Rischi operativi	Affidabilità legata a operatori	Affidabilità legata a robot
Flessibilità di processo	Elevata flessibilità, bassa automazione	Maggiore automazione flessibile: robot riprogrammabile per diversi compiti,

Ergonomia e sicurezza	Sovraccarico manuale, rischio infortuni da sforzo	mantenendo adattabilità a varianti di prodotto Compiti gravosi delegati, riduzione carichi fisici sugli operatori; miglioramento sicurezza generale
------------------------------	---	--

Tabella 1: Confronto sintetico tra scenario attuale (AS-IS) e futuro (TO-BE). I valori sono da considerarsi stime approssimate, basate su dati di scenari e tecnologie simili.

Risorse impiegate e capacità produttiva

Nel TO-BE ne conviene che ci sia una minor fabbisogno di manodopera diretta sulla linea essendo che l'impiego dell'umanoide permette l'impiego di soli 4 operatori umani piuttosto che 5 (-20%). Si ottiene in questo modo una riduzione del costo del lavoro pari a circa 70k €/anno considerando un costo medio di circa 35 k€ ad operaio specializzato [129]. Conseguentemente si assiste all'eliminazione di colli di bottiglia e pause fisiologiche potendo così ridurre il tempo ciclo medio (nel nostro caso, si era ipotizzato in precedenza, da circa 10 a circa 9 min/pz). Questa riduzione equivale a più o meno 5-6 pz/turno in più rispetto alla produzione tradizionale, senza aver dovuto ancora estendere l'orario.

Come era già stato accennato in precedenza, l'azienda può, grazie all'umanoide, estendere l'orario produttivo al di là dei suoi due attuali turni. Magari anche solo aggiungendo un semi-turno di 4 ore serali coperte dal robot (con minima supervisione), la produzione giornaliera potrebbe salire fino a circa 300 pezzi (+50%). L'umanoide permette di sciogliere una delle rigidità attuali, ossia quando la fabbrica restava ferma la notte. Ci si va ad avvicinare ad un modello di pieno impiego dell'impianto, da 16/24h a 20+/24h, con conseguente aumento della produttività per addetto umano (più output, meno persone). Dal lato dell'efficienza dell'impianto non può che notarsi un aumento del valore dell'indice OEE (Overall Equipment Effectiveness) della linea, ovvero l'efficienza complessiva della risorsa produttiva [130]. Proprio per via di una disponibilità maggiore e migliore, sia per la minor percentuale di scarti e fermi, si può stimare un salto dal circa 60-70% ad oltre l'80%. Fonti che trattano il tema in situazioni simili parlano di efficienze vicine al 90%, rispetto al 50% di un sistema simile con operatore umano [124].

Qualità e difettosità

Come evidenziato, la qualità beneficia enormemente della consistenza del robot. Banalmente, tramite l'ispezione automatica real time, si agisce individuando direttamente eventuali anomalie prima dell'arrivo al controllo di fine linea o al collaudo. La Tabella 1 mette in luce un miglioramento ipotetico dal 2% all'1% di scarto interno. Questo dato è piuttosto giustificabile

visto che implementazioni di visione artificiale e robotica proprio in linee di assemblaggio hanno riportato una diminuzione dei difetti di circa il 40% [123]. Valore che non è difficile pensare possa migliorare in maniera più o meno diretta anche la reputazione aziendale e, nel caso di grandi aziende, le sue quotazioni di mercato.

Costi operativi e rigidità vs flessibilità

Economicamente parlando, nonostante sia vero che i costi di manodopera si riducono, è altrettanto vero che c'è l'aumento di quelli di gestione del robot, anche se risultano relativamente contenuti. Guardando alle voci di costo si può leggere come il consumo energetico umanoide ricada nell'ordine di qualche kWh/h di funzionamento; perciò, anche contando 20 ore/giorno di attività, il peso di questa voce di costo rimane davvero limitato (nell'ordine di pochi euro al giorno di elettricità). I costi di manutenzione e software, invece, sono più rilevanti se pur ancora sotto controllo; quindi, assumendo un 5-12% del costo del robot ogni anno per motivi diversi come, per esempio, assistenza, ricambi e licenze, parliamo di 6-14 k€/anno, del qual, in tabella è stato scritto il valor medio, ossia 10 k€/anno totali di costo operativo dell'umanoide. Questo valore è, tutto sommato ma comunque ribadito che sono state fatte semplificazioni. Quindi nel TO-BE il costo variabile unitario diminuisce per via sia della riduzione del personale e sia per il minor tasso di scarto. La versatilità e flessibilità tipiche dell'umanoide, come visto in precedenza, conferisce anche a questo processo una maggior elasticità, prima inesistente, così che per cambi di varianti, entro un certo range di variabilità, sia garantisce l'adattabilità e la resilienza ricercate.

Rischi residui e punti di attenzione

Per ogni aspetto positivo ce n'è uno negativo, o quasi. Non è forse questo il caso, perché, anticipando le conclusioni, il bilancio dell'umanoide in questo caso ipotetico è positivo; ad ogni modo, per onestà intellettuale si deve analizzare e discutere anche i potenziali rischi e svantaggi del nuovo scenario. Si parte con il menzionare l'affidabilità tecnica dell'umanoide, da cui nel TO-BE viene introdotta una dipendenza; ciò significa che un guasto all'improvviso dell'umanoide potrebbe fermare la produzione in quella particolare stazione, creando di nuovo dei colli di bottiglia. Per non incappare nelle stesse problematiche dell'AS-IS, è essenziale, prevedere misure di backup come accordi di assistenza tecnica rapida con il fornitore. Parallelamente a tutte queste valutazioni bisogna ricordare il fatto che gli umanoidi sono ancora in una fase iniziale di ricerca e training a livello di adozione, sicuramente non in fase di prodotti commodity [117]. Ciò implica incertezza nonostante le aziende che li producono stiano lavorando per portare queste piattaforme

alla piena affidabilità commerciale entro pochi anni. È dunque un rischio calcolato, bilanciato dai potenziali benefici.

Dovendo il robot dialogare con l'infrastruttura IT/OT, se fosse che l'azienda non è ancora abbastanza digitalizzata, inserire un umanoide potrebbe richiedere investimenti addizionali in software e connettività. Alcune fonti evidenziano proprio come il fattore complessità nell'integrazione dell'umanoide, se sottovalutato, possa essere un freno [117].

In conclusione, si nota un netto miglioramento per il quasi totale degli indicatori di performance dopo l'ingresso dell'umanoide. Nella prossima sezione si tenterà, invece, una valutazione di tipo economico-finanziario, calcolando il ROI atteso oltre ad altri indicatori (payback, VAN, TIR).

5.4 Stima del ROI dell'investimento in robot umanoide

Dell'inserimento di un umanoide in una PMI manifatturiera, per giustificare l'adozione, bisogna valutarne la redditività, attraverso l'analisi costi-benefici. Di seguito si sviluppa un modello economico realistico semplificato per stimare ROI, payback period, VAN e TIR associati al caso ipotizzato.

Costi iniziali (investimento)

L'investimento iniziale per acquistare un umanoide ad oggi è ancora relativamente elevato, essendo tecnologie estremamente innovative ancora prodotte solo in piccole serie. Il prezzo unitario considerato per l'umanoide calcolato come valore medio ponderato, in base all'eterogeneità significativa dei costi osservabili oggi sul mercato. Da un lato abbiamo soluzioni ancora molto costose come Digit di Agility Robotics, il cui prezzo si aggira intorno ai 200mila € e dall'estremo opposto alternative più economiche come quelle di Unitree Robotics, inferiori ai 20 k€. La media è stata influenzata da previsioni di mercato che indicano, nel breve periodo (2-3 anni), un calo dei prezzi altamente probabile, grazie alla continua industrializzazione della produzione, convergendo a stime di 20-30 k€. Alla luce di queste considerazioni, per cercare di ottenere una stima realistica, ad oggi, del modello TO-BE si definisce un costo di acquisto di 115mila €, a cui si aggiungono 50mila € stimati che includono l'avviamento (configurazione del robot in base alle attività specifiche, eventuali modifiche hardware e formazione iniziale del personale). L'investimento totale iniziale si aggira quindi intorno ai 165mila €, sicuramente minore alla cifra necessaria per isole robotiche rigide.

Costi operativi annuali

Dopo l'introduzione, l'umanoide sopravvive grazie ad altre voci di costo, di cui le principali sono:

- **Energia elettrica:** si considera un consumo di circa 1-2 kW durante il funzionamento e che venga utilizzato 2000 ore/anno (8 h/giorno per 250 gg, completa ipotesi), portando ad un consumo annuo di circa 2000-4000 kWh che, al prezzo industriale medio di 0,15 €/kWh [127], il costo elettrico è irrisorio (300-600 € l'anno), anche se questo valore raddoppiasse o triplicasse. Questo importo è quindi trascurabile rispetto ai benefici.
- **Manutenzione e ricambi:** essendo una tecnologia nuova e in continua evoluzione, non c'è propriamente uno storico (discorso che vale anche per molti altri valori stimati); si sceglie quindi una cauta stima del costo di manutenzione annuo pari al 5-10% del valore del robot [127], quindi circa 9 k €/anno, ovvero 1'8% (scelto come valore intermedio nel range 5-10%) di 115k.
- **Software e licenze:** si ipotizza il software base sia incluso nell'acquisto, ma possano esserci costi per elementi aggiuntivi o per l'integrazione con i sistemi aziendali, difficili da quantificare, ma stimati intorno ai 5 k€/anno [128] (servizi cloud, licenze AI o simili).
- **Altri costi operativi:** assicurazione sull'umanoide, formazione continua per il personale, eventuale connettività (esempio con SIM/5G) costituiscono una voce di costo relativamente bassa di circa 5mila €/anno.
- **Ammortamento:** per quanto riguarda RoBee, di Oversonic Robotics, la sua vita utile economica stimata è di circa 8 anni [16], [132]; quindi, prendendo come riferimento il costo d'acquisto di 115mila €, l'ammortamento lineare su un orizzonte di 8 anni significa una quota annua di 14.375 €.

Anche se non risultano un esborso di cassa effettivo, è necessario considerare questa voce nelle analisi economico-finanziarie che verranno svolte, così da poter imputare ai bilanci aziendali la perdita di valore del robot nel tempo.

Sommendo le voci di costo appena elencate, il costo operativo annuale dell'umanoide è di circa 33.375 €.

Benefici economici annuali

Tutto ciò che si riesce a risparmiare attraverso l'utilizzo dell'umanoide è legato a:

- **Risparmio sul costo del lavoro diretto:** potendo, grazie all'umanoide, operare con due operatori in meno (uno per turno), magari in caso di dimissioni o di spostamento di lavoratori in altre mansioni più critiche rimaste scoperte, il risparmio annuo si aggira intorno ai 70 k€.

- **Aumento di output senza straordinari:** l'umanoide consente di produrre più pezzi, con la stessa struttura produttiva. Se il mercato riesce ad assorbire l'offerta l'azienda può vendere più motori. Si suppone che la capacità aggiuntiva effettivamente generi ulteriori vendite di +20% pezzi/anno (stima mantenuta più bassa rispetto a quella del 25% di McKinsey [131]), con un prezzo medio di vendita posto a 50 €/pezzo e margine di contribuzione del 20% [132]. Con l'AS-IS si aveva una produzione posta a 40mila pezzi, più l'incremento del 20%, ossia 8mila pezzi, margine 10 €/pezzo, si ottiene circa 80mila € di profitto operativo in più rispetto a prima. Questo è un beneficio “opportunità” variabile in base al mercato, ovvero che effettivamente questa produzione ulteriore riesca a vendersi o no; quindi, per prudenza nel ROI, si considera solo una parte di questo potenziale: 40mila €/anno di utile in più da maggior volume, la metà del valore ipotizzato in precedenza.
- **Riduzione dei costi della non qualità:** meno difetti significa risparmio in costi di scarto materiali e rilavorazioni, passando da una quota del 2% ad una dell'1%. Su 40mila pezzi/anno, vuol dire risparmiare 400 pezzi. Essendo il costo industriale di un pezzo 30 €, (parte rimanente del margine di contribuzione) allora il risparmio da scarti è di 12mila €. A questo valore si aggiunge quello relativo alla manodopera risparmiata sulle lavorazioni che non sono state fatte per via di una minor tasso errori e quindi rilavorazioni. Questo valore, difficile da quantificare, si stima di 3mila €, considerando che l'incidenza sul costo del lavoro abbia le stesse dimensioni percentuali del tasso di rilavorazioni, ossia l'1% del costo del lavoro totale annuo. In totale circa si vanno ad evitare 15mila€/anno di costi qualità.
- **Benefici intangibili con impatto economico indiretto:** difficili da monetizzare quindi non inclusi nel calcolo; tuttavia, costituiscono un margine di ulteriore vantaggio. Fanno potenzialmente parte di questo gruppo i minori infortuni sul lavoro, meno interruzioni produttive date da mancanza di personale, maggiore soddisfazione del cliente.

Si ottiene in questo modo un beneficio economico annuo totale di circa $70k + 40k + 15k = 125k$, flusso di cassa lordo aggiuntivo generato dallo scenario TO-BE, rispetto all'AS-IS.

Calcolo degli indicatori finanziari

Sulla base dei costi e benefici stimati, calcoliamo i classici indicatori:

- **ROI (Return on Investment):** permette di misurare il rapporto che c'è tra il beneficio annuo netto e l'investimento iniziale. Con 125mila € di beneficio annuo, costi operativi di 33.375 € e investimento 165mila €, il ROI vale 56% annuo. Per diversamente dire, ogni

anno viene recuperato l'equivalente del 56% dell'investimento. Questo valore è molto interessante, significa che il ritorno è piuttosto robusto e che lo scenario potrebbe essere piuttosto conveniente per quest'industria.

- **Payback Period:** misura quanto tempo è necessario prima di andare in patta con i flussi di investimento iniziali. Il tempo richiesto in questo caso è di 1,8 anni, in linea con quanto spiegato da Agility Robotics per Digit: ROI di 2 anni confrontando il costo di un robot con un lavoratore a 30 \$/h [25]. (Nel nostro caso 30 \$/h corrisponde a circa 27 €/h, vicino al costo effettivo di un operatore in Italia); dunque, in linea con fonti che hanno tentato di stimare i valori di questa tecnologia disruptive emergente [133].
- **Valore Attuale Netto (VAN):** si utilizza un orizzonte di analisi di tre anni, anche per via del rapido cambiamento della tecnologia stessa. Il tasso di sconto (costo del capitale) utilizzato ha valore del 10% annuo [134]; quindi, il VAN viene calcolato come il valore attualizzato dei flussi di cassa meno l'investimento, i quali sono i benefici (125k) senza i costi operativi robot ($33.375 = 91.625 \text{ €/anno circa netti}$). Attualizzando 94,5k per 3 anni al 10% si ottiene un VAN positivo pari a 62.858 €. Se si considerasse poi un orizzonte di analisi pari alla vita utile di 8 anni [16] dell'umanoide, il VAN aumenterebbe ulteriormente.
- **Tasso Interno di Rendimento (TIR):** tasso di sconto che porta a zero il VAN. Con i flussi già citati (-165k iniziale, +91.625 annui per 3 anni), il TIR risulta intorno al 31%. In scenari con maggiore utilizzo del robot (flussi più alti o periodo più lungo) può salire anche oltre il 40%.

Un TIR del 31% è un valore alto per un investimento industriale, indice di un progetto molto redditizio. Anche applicando sensibilità pessimistiche (benefici più bassi del 20-30%), il TIR resterebbe sopra al 15%, cioè in ogni caso superiore al costo del capitale tipico (che per una PMI manifatturiera si può stimare attorno al 8-12%) [135].

Investimento iniziale (una tantum)	
Acquisto robot + accessori	115.000 €
Integrazione e formazione iniziale	50.000 €
Totale investimento iniziale	165.000 €

Costi operativi annui	
Manutenzione	9.000 €
Licenze software	5.000 €
Ammortamento Umanoide	14.375 €
Altri costi (assicurazione, formazione)	5.000 €
Totale costi operativi annui	33.375 €

Flusso di cassa operativo (anno)	
0	-165.000 €
1	91.625 €
2	91.625 €
3	91.625 €

ROI	56%
PayBack (anni)	1,8
VAN	62.858 €
TIR	31%

Benefici economici annui stimati	
Risparmio lavoro diretto	70.000 €
Maggior profitto da output extra	40.000 €
Riduzione costi qualità (scarti/rilavorazioni)	15.000 €
Totale benefici annui stimati	125.000 €

Tasso di sconto	10%
------------------------	-----

In sintesi, la valutazione economico-finanziaria spiega che l'investimento in un umanoide può ripagarsi in circa due anni e generare sostanziali risparmi dopo il payback, in questa impostazione del caso ipotetico (una serie di varianti e diverse combinazioni rimangono, ovviamente, inesplorate). Uno dei punti chiave per raggiungere questi risultati è sfruttare il robot su un orario esteso (più turni) o comunque circa al massimo della sua capacità, così da redistribuire il costo iniziale su più ore di lavoro possibili, condizione che nel caso studio è soddisfatta. Questo aspetto mette sotto la lente di ingrandimento l'importanza della pianificazione contestuale per quanto riguarda il come impiegare l'umanoide, oltre al se farlo o meno. A tal riguardo, i produttori stessi promuovono modelli di impiego intensivo: Agility Robotics suggerisce un ROI<2 anni ipotizzando il robot impiegato senza quasi nessuna interruzione [136].

Se poi si vanno a considerare anche i possibili incentivi finanziari disponibili in Italia, come quelli in automazione e Industry 4.0, che permettono crediti d'imposta o contributi pubblici, si potrebbe recuperare circa il 20% dell'investimento sotto forma di credito d'imposta, migliorando ancor di più il VAN e accorciando il payback [137], [138]. Queste agevolazioni non si includono nel calcolo base ma si ricorda come possano essere un ulteriore motivo a favore dell'integrazione.

Naturalmente i risultati ottenuti dipendono dalle assunzioni fatte; quindi, nella prossima sezione verranno discussi i limiti del modello e verranno fornite raccomandazioni su come approcciare tali progetti per massimizzare le probabilità di successo.

5.5 Discussione finale e raccomandazioni

Di seguito si discutono i principali spunti emersi riguardo gli aspetti critici del modello ipotizzato e le condizioni abilitanti per il successo.

Limiti e assunzioni semplificative

Prima di tutto, lo scenario considerato è stato modellato con una serie di assunzioni ottimistiche ma realistiche come, ad esempio, il fatto che il robot possa effettivamente operare con la stessa velocità di un operatore umano esperto e con uptime così costanti. In realtà, specie all'inizio, potrebbero esserci curve di apprendimento richiesta per l'umanoide, oltre che per il personale, con necessità di fare di tuning e miglioramenti graduali prima di raggiungere le prestazioni target. Uno degli aspetti che ne conseguono è la potenziale diminuzione di efficienza.

Proseguendo, alcune stime (come l'aumento di vendite del 20%) dipendono dal mercato e non sono certe o sicure che avvengano cosicché se la domanda di prodotti non ci fosse, l'aumento di capacità potrebbe rimanere inutilizzato. In fase iniziale di decisione e valutazione, l'azienda dovrebbe svolgere analisi di sensibilità andando a variare i parametri (e.g. costi +10%, benefici – 10% etc.) per assicurarsi che il progetto resti positivo anche in scenari meno ideali, o semplicemente diversi. Per fortuna, almeno in questo caso, anche con variazioni ragionevoli il ROI risulta robusto (come mostrato, anche riducendo i benefici il progetto rimane vantaggioso, pur allungandosi il payback period). Un altro limite intrinseco è che si è valutato un singolo robot su un singolo processo, semplificazione che fa sì che questioni più ampie come l'interoperabilità dell'umanoide con altri macchinari, la cybersicurezza del robot collegato in rete, o l'impatto sull'intera organizzazione, siano state solo accennate e non discusse.

Scalabilità e replicabilità

Una domanda che potrebbe sorgere spontanea è se sia conveniente introdurre più di un robot se lo scenario con un singolo umanoide funziona così bene. In futuro, l'azienda potrebbe pensare di estendere l'automazione da 1 a più umanoidi sia sulla stessa linea (coprendo più postazioni) sia in reparti diversi. I risultati di questo caso in particolare sembrerebbero rispondere affermativamente alla domanda ma bisogna procedere con criterio; infatti, aggiungendo un secondo o terzo robot sulla medesima linea potrebbe sì automatizzare altre fasi ma i rendimenti marginali potrebbero

decrescere, aumentando magari la complessità computazionale inutilmente. L'altra faccia della medaglia però è che effettivamente più unità potrebbero condividere alcuni costi fissi (un unico manutentore per più robot, i software acquistati essere riutilizzati, etc.), creando economie di scala interne.

Nella logica modulare che quindi si consiglia, la PMI potrebbe in futuro arrivare ad avere un'intera squadra di umanoidi operativi, dove questo scenario, ad oggi ancora apparentemente fantascientifico, è considerato da alcune fonti plausibile entro il prossimo decennio (a livello globale si stimano più di 2 milioni di umanoidi in attività nei prossimi 10 anni [139]).

Impatto su organizzazione e competenze

È fondamentale che l'azienda investa in formazione, per poter gestire questi nuovi modelli di produzione ibrida cyber-umani: sia degli operatori umani, sia dei tecnici manutentori dei robot. Per queste competenze ci si può affidare ad un supporto esterno (integratori di robotica, consulenti, oppure ricorrere ai competence center come CIM 4.0 e similari, che aiutano le PMI a implementare anche soluzioni di questo tipo o similari). Tra le buone norme da implementare ci sono quindi: creare subito una piccola squadra interna dedicata, comunicare con trasparenza gli obiettivi agli operatori (incontri, demo e training pratici potrebbero aiutare), prevedere una fase di convivenza prima di far sì che la mansione dell'operatore evolva sempre più in ruolo di supervisione e controllo qualità. La polivalenza rimane un tema comunque fondamentale.

Condizioni abilitanti e fattori critici di successo

Dall'analisi svolta si derivano alcuni fatto che è importante tenere a mente in quanto risultano fondamentali per la buona riuscita del progetto.

Tra questi il supporto del top management e una visione strategica chiara in modo da investire in un umanoide ma con dietro, a guidare, un piano di trasformazione digitale più ampio dell'azienda. Anche solo per saper accettare e gestire la fase iniziale di instabilità, sostenendo l'innovazione non solo con risorse ma anche con convinzione, il management è cruciale.

Altro fattore strategico è la corretta scelta del partner tecnologico, visto che le PMI difficilmente hanno le competenze necessarie in-house. Quindi, valutare non solo il robot, ma anche fattori come livello di assistenza post-vendita, facilità di programmazione, compatibilità con standard esistenti. A proposito di readiness tecnologica, è importante essere riforniti di una sufficiente infrastruttura IT/OT di base, ma non solo; infatti, anche l'ambiente fisico deve essere preparato e adatto al contesto della nuova soluzione non lasciando, quindi, che il robot sia sistemato in reparto senza una apposita progettazione del suo deployment. Un ultimo e rapido aspetto, anche se può risultare

scontato, è l'elemento “cultura aziendale”; si intende che, aziende già abituate al miglioramento continuo e a coinvolgere gli operatori nelle decisioni, percepiranno l'integrazione come più naturale, aumentando le probabilità di successo. Viceversa, realtà molto più tradizionali potrebbero trovare maggiori resistenze.

In conclusione, alla luce dell'analisi svolta, si possono formulare alcune raccomandazioni:

- Partire con un progetto pilota contenuto, implementando un primo umanoide in una singola applicazione ben scelta e chiara, per poi valutarne l'estensione, così da imparare e poi aggiustare il tiro, riducendo al minimo i potenziali danni [117].
- Gestire l'integrazione portando attenzione al fattore umano, tramite coinvolgimento degli operatori e spiegazione dei benefici, oltre al nominare dei responsabili interni del progetto.
- Assicurarsi supporto tecnico continuo tramite contratti di manutenzione consistenti, in modo da minimizzare i downtime nel caso sorgessero problemi.
- Sfruttare incentivi e collaborazioni, informandosi su bandi o crediti d'imposta così da ridurre il costo dell'investimento. Inoltre, collaborare con centri di ricerca o università locali può aiutare nel supporto su aspetti di AI o programmazione robot, ammortizzando ulteriormente i costi.
- Pianificare la scalabilità sin dall'inizio, ovvero avere un progetto strutturato a lungo termine, in modo da essere pronti e non perdere poi il vantaggio che si sta acquisendo nell'investire anticipatamente.

6. Analisi di Fattibilità e Impatti

6.1 Readiness tecnologica e infrastrutturale: umanoidi vs altre piattaforme

Dal momento in cui si sta analizzando l'introduzione di umanoidi nelle fabbriche, bisogna anche chiedersi quale sia la maturità tecnologica e il livello di adeguatezza delle infrastrutture esistenti oggigiorno, soprattutto se confrontati con piattaforme robotiche già consolidate o meno complesse.

La Tabella 2 rappresenta il confronto sintetico secondo una serie di criteri chiave tra robot umanoidi e i due principali concorrenti su un piano di adozione pratica ed efficacia.

Criterio	Robot Umanoidi	Mobile Manipulators (AMR/AGV + cobot)	Cobot (Collaborativi)
Maturità tecnologica	Sperimentale; TRL variabile, in base al modello preso in considerazione [140]. Ancora	Emergenti; integrazione di AMR e bracci industriali. Applicazioni pilota, precisione	Maturi; disponibili commercialmente da circa 15 anni. Quota circa del 10% delle nuove installazioni industriali già nel 2023 [142]. Standard di sicurezza

Sicurezza	costosi e prodotti in piccola serie.	limitata e tecnologia complessa (TRL circa 6-7, casi speciali a TRL8)[141]. In sviluppo; necessarie funzioni avanzate per operare vicino a persone. Norme esistenti (ISO 10218) non specifiche per humanoidi. Sfide nel garantire stabilità (se bipedi) e affidabilità all'errore.	Criticità presenti: portano con loro rischi di AMR e cobot. Problemi di sicurezza e affidabilità segnalati [141].	ad-hoc (ISO 10218-1:2021, ISO/TS 15066).
Integrazione impianto	Pensati per ambienti umani brownfield, minimizzano i cambi all'infrastruttura esistente. Tuttora limiti di velocità e precisione rispetto agli attuali sistemi ad-hoc. Standard industriali ancora non ottimizzati per humanoidi. Lavorano in spazi e posture umane, alleviando compiti gravosi. Però la collaborazione diretta è limitata ancora. Svolge maggiormente compiti in maniera indipendente.	Problemi di comunicazione rete possono fermare l'operatività [141]. Infrastrutture di ricarica e spazi maggiori e dedicati per muoversi richiesti.	Integrazione facile (plug&play) frequente [142]. Non richiedono celle protette né riprogettazione radicale. Perfetti per PMI con linee manuali, collaborano senza stravolgere il layout.	
Ergonomia e interazione	Richiedono manutenzione avanzata. Batterie e attuatori comportano usura significativa. MTBF non ancora ben documentato. Il costo di manutenzione elevato se non c'è produzione di scala.	Lavorano in parallelo agli umani. Migliorano l'ergonomia indirettamente. Richiede attenzione per evitare collisioni.	Collaborativi per definizione. Alleggeriscono carichi monotoni o pesanti. Interfaccia user-friendly.	
Manutenzione	Oggi elevato. Basso grado di standardizzazione, quindi,	Complessità elevata da manutenere. Necessitano competenze sia di robotica che di fleet management. Il tutto in base ai componenti specifici.	Relativamente semplici, design snello. Affidabilità e autodiagnosica (alcuni cobot segnalano necessità di calibrazione/manutenzione via software) [144].	
TCO e costi		Alti costi per via della combinazione delle due tecnologie. Ma per	Moderato: il prezzo medio di un cobot industriale (payload ~10 kg) è di circa 25-60 k€. Anche modelli meno costosi	

Flessibilità operativa	costi di integrazione customizzati. Alti consumi energetici e manutenzioni onerose. Potenziale riduzione costi con economie di scala future [145].	compiti in cui vengono sostituite più macchine il TCO viene giustificato.	con però funzionalità più limitate [146]. Consumi elettrici ridotti e contenuta esigenza di riconfigurazione impianti.
	Alta: concepiti come robot versatili e flessibili [147]. Limiti allo stato dell'arte: autonomia energetica limitata, velocità di esecuzione minore che quella umana.	Alta: rompono il concetto di postazioni fisse. Ideali per produzioni ad alta varietà di prodotto e layout riconfigurabili. Data la base mobile è più limitata la precisione dei bracci.	Medio-Alta: facile riprogrammazione e rilocazione. La flessibilità è uno dei principali vantaggi dei cobot nelle produzioni discontinue o miste [142].

Tabella 2: Confronto tra piattaforme robotiche avanzate secondo vari criteri

Si può notare dalla tabella una serie di trade-off principali. I robot umanoidi permettono una flessibilità indiscussa e questo li renderebbe particolarmente adatti a quei contesti come il manifatturiero italiano dove si trova alta varietà dei prodotti e impianti tradizionali. Ciò nonostante, allo stato dell'arte, non ci si trova davanti ad una readiness tecnologica sufficiente degli humanoidi. È opinione diffusa in alcune fonti come sia difficile che gli humanoidi vadano a sostituire, a breve, la robotica industriale di oggi, tutt'alpiù verrà completata dove non possibile [147]. Tra gli elementi che non permettono a questa tecnologia di essere pronta già oggi si notano ostacoli tecnici come l'autonomia energetica, i costi alti e controllo ancora poco robusto [145]. D'altra parte, soluzioni come i cobot e i mobile robots sono già oggi maggiormente disponibili e vantaggiosi in specifiche condizioni, data anche magari la loro maggior “semplicità” strutturale relativa. Questi aspetti si concretizzano in una eccellente collaboratività dei cobot in quelle attività ad alto tasso di interazione diretta e flessibilità di programmazione; invece, i mobile manipulators troveranno probabilmente maggior impiego in contesti di logistica interna e asservimento multi-postazione, riducendo trasporti manuali e aumentando la resilienza dei flussi operativi. Queste ultime due soluzioni permetterebbero di mantenere l'occupazione qualificata, migliorando aspetti quali la sicurezza e la produttività, senza le barriere potenzialmente tipiche degli humanoidi.

In sintesi, gli humanoidi presentano il potenziale più versatile ma sono limitati per via dell'immaturità tecnologica, rispetto a piattaforme alternative. Finché questo aspetto non verrà

risolto, quindi implementato è probabile un utilizzo complementare delle soluzioni robotiche citate.

6.2 Impatti occupazionali: sostituzione vs complementarità

L'introduzione di robotica a questo livello e con questi tipi capacità può influenzare profondamente il lavoro umano, portando da una parte alla sostituzione dei lavoratori oppure a una complementarità uomo-macchina capace di aumentare la produttività e la sicurezza. In letteratura ci sono a riguardo opinioni contrastanti, talvolta in base al contesto temporale e geografico in analisi.

Negli ultimi anni, sui robot industriali tradizionali sono stati pubblicati studi, come nel caso di Acemoglu & Restrepo (2020) sui dati manifatturieri negli USA, che mostrano come per ogni robot industriale aggiuntivo ogni 1000 lavoratori, 6 posti di lavoro per area esposta andavano persi [148], [149]. Contemporaneamente i salari medi si sono ridotti, segnalando un impatto non positivo sui lavoratori [148]. Questi effetti sono risultati più acuti in quei settori con un alto numero di robot e per quei lavori estremamente ripetitivi e manuali, evidenze in linea con la “displacement hypothesis” [149], secondo cui i robot tendono a rimpiazzare mansioni ripetitive, andando a ridurre la domanda di lavoro umano poco qualificato.

L'altra faccia della medaglia riguarda, invece, quegli studi internazionali che spiegano come su lungo periodo non ci sia correlazione tra livello di occupazione e integrazione robotica. Graetz & Michaels (2018), hanno rilevato che la diffusione di robot industriali ha aumentato significativamente la produttività del lavoro senza impattare negativamente sull'occupazione macroscopicamente. A questo proposito, in certi paesi si osservano fenomeni come la rilocalizzazione di attività produttive, con conseguente creazione di posti di lavoro qualificati [150] ma non solo; infatti, l'automazione stimola la competitività e quindi la crescita dell'azienda, creando nuove opportunità di lavoro e aumentandone l'attrattività lavorativa [150]. Essenzialmente c'è un doppio effetto in gioco: da una parte displacement in alcune mansioni, dall'altra nuova domanda di lavoro altrove grazie a maggior produttività e nuovi processi possibili. Il bilancio è basato sulla capacità di adattamento del sistema economico.

Nel manifatturiero italiano, all'idea di robot avanzati è stato associato più che altro un concetto di complementarità piuttosto che di sostituzione pura, adottando per esempio cobot per automazioni di parti del processo ma mantenendo il ruolo dell'operatore qualificato. Un esempio recente di questo approccio è l'impianto “*E-building*” di Ferrari di Maranello (MO) [151] dove l'operatore diventa un tecnico supervisore mentre i compiti pesanti o ripetitivi sono delegati al robot.

È già stato menzionato come i temi dell’upskilling e reskilling dei lavoratori sia un tema fondamentale per evitare polarizzazioni delle competenze nel mercato del lavoro. In Italia sono stati proposti diversi progetti per formare Tecnici 4.0 capaci di lavorare con le nuove tecnologie [152], [153]. L’introduzione di umanoidi, quando avverrà in maniera definitiva, richiederà figure formate ad-hoc per gestirli, alleviando l’impatto negativo sull’occupazione.

Sul fronte della sicurezza sul lavoro, i robot fino ad oggi hanno avuto un impatto positivo, sono infatti andati a ridurre in maniera significativa gli infortuni [154], [155]. Con i cobot si è migliorata l’ergonomia, come nell’emblematico caso dell’impiego nel pick-and-place in linee di assemblaggio, che va ad eliminare i movimenti ripetitivi di prelievo e movimentazione dei pezzi [156].

Bisogna però ricordare, anche se già citato in precedenza, che l’interazione stretta con robot autonomi crea anche nuovi rischi legati ai malfunzionamenti arrivando a potenziali nuovi pericoli. A questo proposito, da una parte gli standard di sicurezza dovranno essere rigorosi e continuamente aggiornati mentre in parallelo dovrà svilupparsi una forte cultura della sicurezza da parte proprio dei lavoratori e del business.

Per concludere, le informazioni attuali sembrano suggerire un approccio bilanciato negli aspetti tecnici e sociali, mantenendo l’essere umano al centro dei processi [147].

6.3 Impatti ambientali: LCA, consumi energetici ed economia circolare

Oltre agli effetti sul lavoro, adottare soluzioni robot (non solo umanoidi) porta ad impatti ambientali, diretti (e.g. consumo energetico operativo) ed indiretti (produzione del robot, manutenzione, fine vita).

Dal punto di vista del ciclo di vita (Life Cycle Assessment) del robot, ci sono studi che imputano alla fase operativa del robot stesso la maggioranza delle emissioni di gas serra associate. Dijkman & Rödger (2015), infatti, spiegano che per robot industriali in fabbrica l’energia consumata durante gli anni di funzionamento supera quella impiegata in produzione della macchina stessa, almeno per quanto riguarda l’impronta di CO₂ [157]. Si stima in particolare che più del 75% delle emissioni totali di CO₂ di un robot con doppio braccio per manipolazione (analisi svolta per l’industria elettronica) sia causata dall’energia elettrica impiegata per il suo funzionamento e quindi nel corso della sua vita utile, quando invece produzione e smaltimento compongono il restante 25% scarso [158]. Da questo si può dedurre che siano proprio l’efficienza energetica dei robot e la decarbonizzazione dell’elettricità nelle fabbriche i fattori principali al fine di ridurre

l'impatto ambientale netto dell'automazione. Perchè infatti, se l'elettricità proviene da fonti fossili, allora significa decine di tonnellate di CO₂ emesse per ogni robot, lungo la sua vita utile, ma se si riforniscono i robot con energia rinnovabile è possibile ridurre drasticamente queste emissioni operative [159].

I produttori di queste soluzioni robotiche stanno cercando di dare una risposta proprio anche in questo senso, attraverso soluzioni di power saving come, ad esempio, modalità *sleep* automatiche e recupero di energia (cinetica) durante i movimenti di discesa o le frenate [94]. Altre tecniche per ridurre i valori di questi parametri sono l'introduzione di materiali più leggeri nel design del robot, così da ridurre l'inerzia e quindi l'energia spesa dai movimenti, come nel caso del cobot Igus ReBeL, composto maggiormente da materiali polimerici in modo da pesare complessivamente pochi chili [160]. Anche per quanto riguarda attuatori (o end effectuators) sono state realizzate soluzioni più sostenibili come pinze bio-ispirate, capaci di forza elevata e un consumo energetico quasi nullo in “posizione chiusa” [154].

Per quanto riguarda i benefici ambientali indiretti, la robotica migliora l'efficienza dei processi di produzione così da ridurre sprechi e scarti. Proprio grazie alla loro elevata precisione, i robot migliorano il rapporto tra output e input facendo in modo di fare “di più con meno” [94]. Quindi la robotica avanzata risulta necessaria al fine di rendere sostenibile economicamente la transizione ecologica di alcuni settori.

È inoltre importante riflettere sulla capacità degli umanoidi di favorire l'evoluzione verso modelli di dark factory, scenari particolarmente rilevanti soprattutto da un punto di vista energetico ed economico, consentendo di ridurre significativamente i consumi (illuminazione, riscaldamento, ventilazione, climatizzazione). L'umanoide, quindi, grazie anche alla sua capacità di lavorare non-stop, porta da un lato, un risparmio diretto in termini di costi operativi e, dall'altro, un abbattimento delle emissioni connesse al ciclo produttivo.

Logicamente si giunge al tema del fine vita dei robot, dove ci si trova di fronte sia a sfide sia ad opportunità in tema economia circolare. Nel caso di un umanoide in particolare, idealmente, a fine utilizzo, sarebbe desiderabile il ricondizionamento o l'aggiornamento dello stesso per prolungarne la vita; oppure, lo smontaggio e la separazione dei materiali riciclabili [161]. Programmi di questo tipo, dove grandi aziende iniziano a rivendere o rigenerare i propri robot, stanno emergendo. In futuro, un mercato di seconda mano di robot umanoidi potrebbe ridurre l'impatto ambientale e risultare più economico rispetto all'acquisto ex-novo del robot, salvando fino al 25% della spesa [162]. Si può intuire facilmente come diventi un prerequisito fondamentale di questo mercato di

seconda mano la definizione di standard simili al tema del Design-for-Recycling. Da tenere in considerazione è la scarsità, ad oggi, in letteratura di dati completi sull'LCA degli umanoidi, essendo principalmente prototipi: questa è una criticità conoscitiva [163]. Ogni valutazione rimane basata sulle analogie con altri robot e/o su assunzioni, divenendo quindi necessari studi dedicati man mano che la tecnologia si avvicinerà alla commercializzazione su scala.

6.4 Il modello Robot-as-a-Service (RaaS)

Il modello di business Robot-as-a-Service (RaaS), in cui i robot non vengono comprati in proprietà dall'azienda cliente bensì forniti sottoforma di servizio da un fornitore specializzato, al costo di un canone o prezzo a consumo è una delle risposte che si cerca di offrire per rispondere al problema di costi iniziali di investimento ostacolanti e mancanza di competenze interne per la gestione della complessità di questa tecnologia.

Nel RaaS più standard il fornitore fornisce uno o più robot all'azienda cliente, pur rimanendo di sua proprietà, il cliente paga un canone periodico o una tariffa variabile invece di dover pagare il costo capitale iniziale [164]. Nel canone dovrebbero risultare inclusi servizi come la manutenzione ordinaria e straordinaria [165], aggiornamenti software, supporto tecnico, a volte la garanzia di operatività (la quale permette di mantenere con più certezza in piedi l'operatività del sistema e quindi degli impianti) [164].

Questo metodo offre una serie di vantaggi, si discutono in particolare quelli per le PMI:

- **Barriera di ingresso ridotta:** non serve disporre di grandi capitali per acquistare un umanoide, né sostenere un investimento così oneroso, anche se ne avesse la capacità finanziaria; infatti, basta un canone per rendere l'advanced robotics accessibile anche a PMI, così da trasformare una parte di Capex in Opex.
- **Scalabilità e flessibilità:** si può iniziare con il noleggiare un robot e poi aumentarne o diminuirne il numero in base alle necessità di produzione, in maniera modulare ma sempre rispettando eventuali vincoli contrattuali, opzione particolarmente utile nel caso di mercati stagionali. Questa flessibilità è fondamentale perché permette di innovare senza stravolgere l'azienda finanziariamente parlando.
- **Aggiornamento tecnologico continuo:** il cliente del RaaS, quindi, beneficia di tecnologie sempre all'avanguardia, senza doverle acquistare nuove ogni volta. Essendo che i robot umanoidi evolvono così velocemente questo aspetto è particolarmente importante perché significa disporre di versioni sempre più capaci man mano che il provider le rende disponibili, invece di ritrovarsi con una tecnologia presto obsoleta.

- **Riduzione del rischio:** tramite il RaaS la maggioranza del rischio è addossato al fornitore, potendo così ridurre le incertezze tecnico-economiche legate al funzionamento e all'effettivo ROI dell'umanoide. Infatti, se il robot non performa come promesso, il cliente può rinegoziare o concludere il servizio senza ingenti capitali investiti e ora bloccati in magazzino. A tutto ciò si aggiunge poi la manutenzione e le riparazioni, che ricadrebbero (anche se sono condizioni ad-hoc in base al contratto specifico) sul provider, il che risulta particolarmente comodo essendo l'umanoide una tecnologia nuova e quindi di complessa gestione. A proposito si cita l'esempio di Agility Robotics, che propone Digit principalmente tramite abbonamento RaaS, offrendo la garanzia di sostituzione del robot e/o l'intervento entro poche ore se presenti guasti [166].

Dal punto di vista del fornitore di RaaS, questa modalità garantisce un'entrata ricorrente e la fidelizzazione del cliente, ma comporta sfide nuove, dovendo autofinanziare i robot, gestire la manutenzione e il ciclo di vita, e ripartire i costi su contratti a lungo termine. Diventa quindi fondamentale progettare i robot in modo tale che risultino più possibile robusti e modulari, in modo da minimizzare downtime e costi di servizio. È quindi interessante notare come uno degli effetti del RaaS potrebbe essere proprio questo prioritizzare il miglioramento dell'affidabilità e la manutenibilità del prodotto/servizio offerto, proprio perché genererebbe costi per il fornitore stesso; perché, il provider è incentivato a progettare componenti di lunga durata e facilmente sostituibili.

Questa agilità dell'investimento potrebbe essere particolarmente utile in Italia, dove molte PMI tendono ad evitare grandi stravolgimenti e investimenti one-shot così rischiosi, nonostante siano aperte a miglioramenti incrementali e graduali.

In base al principio del modello RaaS si potrebbe delineare anche lo scenario cooperativo per cui più aziende della filiera condividono i robot forniti dallo stesso provider, impiegandola “a rotazione” dove più sono necessari, massimizzandone il tasso di impiego e riducendo sprechi di capitale con impatto positivo anche sull’ambiente. Questo scenario certamente però necessiterebbe di una serie di allineamento a livello collaborativo e contrattuale lungo tutta la filiera coinvolta. Nel mondo in rapida crescita degli umanoidi, il RaaS potrebbe essere quasi una necessità iniziale dato il costo e la complessità di questi sistemi e il fatto che probabilmente poche aziende vorranno e/o saranno capaci da sole di gestire e organizzare queste tecnologie. Questa affermazione trova riscontro nell’esperienza delle prime e poche realtà che stanno testando umanoidi in partnership con i produttori, come il caso di Agility Robotics e GXO Logistic [167].

Il RaaS sviluppa la robotica permettendole di diventare un servizio modulare, riducendo le barriere all’ingresso e distribuendo i costi nel tempo per quelle realtà imprenditoriali che potrebbero avere difficoltà a questo proposito. Per italiana, composta in gran numero da PMI poco capitalizzate, ciò può essere un punto di svolta.

In base ad alcune stime, i costi operativi che si intende raggiungere, per gli umanoidi impiegati attraverso il modello RaaS, potrebbero aggirarsi su 10-15 \$/h, facendoli così essere competitivi con i valori medi di salario degli operatori in molti paesi avanzati [168]. Bisogna mettere in evidenza però il fatto che il RaaS richiede un ecosistema maturo per poter essere funzionante e funzionale; quindi, sono necessari provider consistenti e con la capacità di finanziare molti robot e conseguentemente di gestirne l’operatività, un quadro contrattuale definito chiaramente e un rapporto di fiducia tra cliente e fornitore. Generalmente, nella cultura imprenditoriale italiana, c’è storicamente preferenza per la proprietà dei beni produttivi; quindi, passare a un modello di outsourcing potrebbe ricevere opposizioni inizialmente, se non si lavora sulla cultura industriale.

6.5 Limiti dell’analisi e rischi di implementazione

Nell’analizzare i potenziali impatti dei robot umanoidi nel manifatturiero italiano, bisogna citare alcune limitazioni legate all’implementazione di queste tecnologie emergenti. Tra queste:

- **Limiti dei dati e delle evidenze disponibili:** poiché i robot umanoidi non sono ancora abbastanza diffusi commercialmente in contesti produttivi è complesso fare assunzioni e ipotesi a proposito che non utilizzino robot industriali, cobot e AMR come ispirazione. Le evidenze sperimentali sugli umanoidi nell’industria sono limitate a pochi progetti pilota, spesso coperti da riservatezza. Questo introduce incertezza, potendo gli umanoidi divergere, per comportamento, dalle previsioni, in negativo ma in realtà anche in positivo. Perciò, i risultati esposti vanno letti come analisi prospettiche con un certo margine di errore, non come predizioni certe.
- **Generalizzazione al manifatturiero italiano:** il settore manifatturiero è eterogeneo e i trend medi possono non essere rappresentativi delle specifiche realtà di un sottosettore o di una regione o addirittura di una particolare azienda. Le conclusioni a cui si giunge in questo documento andrebbero poi, naturalmente, contestualizzate caso per caso.
- **Rischi organizzativi e di accettazione umana:** il fatto che i lavoratori potrebbero non accettare l’integrazione umanoide è un rischio concreto, a causa di timori di sostituzione del lavoro o anche solo diffidenza verso un robot dalle sembianze antropomorfe. L’ergonomia, a livello cognitivo, di lavorare accanto a un umanoide non è un fattore da

dare per scontato: il ritmo e la comunicazione devono essere tarati sugli operatori, così da non creare disagi. Questo porta a potenziali necessarie customizzazioni, magari non a livello di singolo operatore, ma probabilmente a livello di filiera o sottosettore.

- **Rischio di dipendenza dal fornitore:** affidarsi al RaaS o a tecnologie proprietarie porta con sé il pericolo di dipendenza da pochi fornitori; situazione scomoda nel caso in cui il provider dovesse fallire o decidere di aumentare in maniera consistente i canoni. Se in particolare si riporta l'attenzione sulle PMI, a questo proposito, la loro potenziale fragilità contrattuale verso grandi fornitori è un punto critico e quindi da tenere in considerazione.
- **Rischi finanziari e di ROI negativo:** nonostante si siano descritti possibili ritorni positivi, c'è comunque il rischio non ci sia un sufficiente ritorno sull'investimento dell'umanoide. Le cause potrebbero essere ricercate legate al sottoutilizzo del robot, a costi imprevisti o alle capacità robotiche inferiori rispetto alle aspettative. Questi potrebbero essere alcuni dei casi in occasione dei quali l'azienda otterrebbe un TCO maggiore dei benefici. Questo rischio è maggiore con tecnologie immature; quindi, fino a quando non si raccoglieranno dati sul campo, l'incertezza sui ROI rimane notevole, perciò per alleviare il rischio, come già citato precedentemente, si consiglia di partire con progetti pilota modulare in maniera graduale.
- **Implicazioni etiche e normative:** l'utilizzo di umanoidi lascia che sorgano domande e questioni relative alla responsabilità in caso di incidente e non solo. Ad oggi sono disciplinati solamente robot industriali tradizionali e collaborativi, ma un umanoide darebbe il via a interazioni non ancora pienamente regolamentate perché non ancora sperimentabili completamente. Queste problematiche nuove nascono soprattutto a causa dell'autonomia decisionale e delle capacità di adattamento possibili grazie all' AI. Riguardo alla possibile sorveglianza bisogna considerare al potenziale capacità dei robot dotati di sensori e telecamere di raccogliere dati su ambienti e persone: serviranno politiche chiare per la privacy in fabbrica. C'è il rischio di reazioni pubbliche negative se l'introduzione di umanoidi venisse percepita come disumanizzazione del lavoro o come non regolamentata lato privacy in fabbrica; quindi, serve comunicazione interna (dal management agli operatori) ed esterna (dai produttori al mondo) per enfatizzare gli aspetti positivi e aiutare a ridurre le narrazioni allarmistiche.

7. Conclusioni e Prospettive Future

7.1 Sintesi dei risultati

Grazie all’analisi sviluppata nei precedenti capitoli si deducono una serie di messaggi chiave riguardanti il ruolo dei robot umanoidi nelle fabbriche. Prima di tutto, il valore dell’approccio ad un umanoide dipende strettamente dal livello di human-scaling del contesto a cui si applica; infatti, i robot con fattezze e movimenti simil umani sono particolarmente vantaggiosi laddove ci sono ambienti e postazioni progettati per operatori umani [169]. Se quelli in esame sono contesti caratterizzati da spazi, strumenti e interfacce adatti proprio per l’utilizzo umano, allora un umanoide può lavorare senza rendere necessarie riconfigurazioni costose [4].

Proseguendo con l’analisi, si è discusso come ci siano differenze tra adozione *brownfield* e *greenfield*. Nel primo caso l’introduzione dei robot si scontra con i vincoli di retrofit: a meno che non sia esplicitamente necessario la deambulazione bipede avere un robot capace di deambulazione o di testa umana, soluzioni altre rispetto ai “classici” umanoidi potrebbero avere prestazioni migliori in compiti localizzati e ripetitivi [170]. In altre parole, in un *brownfield*, un mobile manipulators potrebbe svolgere movimentazioni da una posizione/postazione ad un’altra più facilmente ed efficientemente di un umanoide, se il contesto lo permette a livello strutturale. Dall’altra parte, in impianti *greenfield*, l’automazione può essere progettata a priori consentendo potenzialmente di insistere maggiormente sull’automazione e riducendo alcuni rischi rispetto ad applicare un retrofit [171]. In questi contesti, gli umanoidi non sono la scelta predefinita, dato che soluzioni specializzate o combinazioni di esse possono garantire throughput e affidabilità elevati su linee ottimizzate. Ci sono casi in cui continuare ad integrare nuovi dispositivi per ogni variante di produzione risulta esageratamente costoso e oneroso anche da un punto di vista delle tempistiche, fattori riducibili con un umanoide, visto come piattaforma robotica che permette di non dover reingegnerizzare in continuazione. In sintesi, il secondo aspetto che è importante evidenziare è come il vantaggio umanoide sorga con il crescente grado di incertezza e variabilità del compito, in maniera proporzionale.

Un terzo aspetto è relativo al trend delle dark factory e come all’aumentare del livello di automazione in direzione lights-out, il ruolo così centrale ad oggi degli operatori umani tenda a ridursi. È vero che si è analizzato e spiegato di come le fabbriche completamente automatizzate portino benefici di produttività, qualità e costi operativi [172]; ciononostante, si è scoperto anche che oggi un’automazione di questo tipo è ancora molto poco frequente. Dunque, nel percorso di transizione tra i due scenari estremi, rimane fondamentale far convivere e cooperare operatori e

robot, in aggiunta a infrastruttura IT/OT e al change management. Questo aspetto rimarca l'importanza cruciale nel breve-medio termine dell'interfaccia con gli operatori umani.

Infine, il tema degli impatti socio-organizzativi significativi impressi dall'integrazione dell'advanced robotics in generale ma in particolare degli umanoidi, a riconferma delle criticità già analizzate. Da un lato ci sono i temi di salute e sicurezza che considerano l'adozione di robot una soluzione ai compiti pericolosi e/o usuranti umani [173]; dall'altro, si parla dei rischi a livello sociale legati alla trasformazione del lavoro, potendo l'automazione eliminare mansioni manuali ripetitive ma anche creare nuovi ruoli tecnici, rendendo necessaria una consistente riqualificazione del personale [174]; in particolare, da ruoli operativi a ruoli di supervisione, manutenzione e programmazione dei robot [175]. Questo può generare resistenze se non adeguatamente gestito diventando uno degli aspetti decisivi per il successo o il fallimento dei progetti di questo tipo.

7.2 Brownfield vs. Greenfield

Un aspetto dedotto dall'analisi è la differenza di approccio tra l'introduzione di robot in contesti brownfield rispetto ai greenfield.

Adozione in brownfield: come è facile immaginare e già evidenziato in precedenza, molte aziende preferiscono soluzioni facilmente integrabili senza stravolgimenti; in questo senso un mobile manipulator, potrebbe risultare spesso la scelta più pragmatica rispetto a un umanoide bipede. Finché le operazioni non richiedono in maniera specifica di locomozione su gambe o testa/viso umani, i mobile manipulators sembrerebbero offrire maggiore efficienza a minor costo [170]. A questo proposito, anche il costo di un manipolatore mobile potrebbe avere voci di costo con valori inferiori, basta pensare alla maggior efficienza energetica del muoversi su ruote che su gambe, a cui si aggiunge il tema della stabilità, della frequenza della manutenzione e della rapidità dei tempi ciclo (potenzialmente più rapidi) [170], [176]. In generale, per le PMI l'approccio logico consigliato in brownfield è quello di utilizzare una soluzione di advanced robotics completa così da ottenere alti livelli di automazione e efficientamento senza modifiche impiantistiche viscerali, in base al tipo di processi e impianti dell'azienda <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/new-ifr-position-paper-on-humanoid-robots-published>. L'importante, dal punto di vista manageriale, è svolgere valutazioni oneste riguardo questa necessità.

Progettazione greenfield: in questo scenario, potendo il management scegliere a priori la combinazione ottima di tecnologie e layout, è possibile spingere sull'automazione integrando robotica di diverso tipo già dall'inizio [171]. In questo caso si tende a favorire soluzioni

specializzate anziché umanoidi generici. Questo perché in un impianto nuovo si possono evitare le inefficienze ancora tipiche della forma umanoide (maggior lentezza, capacità di carico limitata, complessità meccanica) costruendo soluzioni robotiche flessibili ma ad-hoc. Ciononostante, anche nel greenfield possono esserci le necessità di implementare un umanoide, come ad esempio un contesto produttivo molto dinamico tendente ad una produzione più di tipo “artigianale. I risultati di questa macroanalisi suggeriscono che una volta superato un certo livello di varietà e imprevedibilità, l’umanoide può diventare l’opzione più vantaggiosa a livello economico: nel medio termine da un punto di vista aziendale e a lungo termine dal punto di vista tecnologico dello sviluppo della tecnologia umanoide. Quindi, al contrario, in assenza di condizioni particolari, la regola rimane comunque quella di privilegiare robotica non umanoide, perché rischierebbe di essere sovradimensionato e sottoutilizzato rispetto a sistemi più semplici.

7.3 Verso la dark-factory

Il tema che sta alla base è la tendenza trasversale ad una sempre maggior automazione, sempre più intensa fino al concetto di dark factory, in cui l’impiego dell’operatore umano è portato ai minimi termini. Dalle analisi svolte emerge che lo stato attuale e quello futuro richiedono approcci differenti. Ad oggi, per la maggioranza delle PMI, lo scenario più fattibile è una factory “semioscura”, ossia automazione densa ma ancora presenza di operatori per mansioni a metà tra l’operatività la gestione [172]. È a questo livello che tecnologie come i cobot e gli umanoidi trovano uno spazio per essere complementari all’ambiente in cui vengono inseriti, permettendo di automatizzare processi specifici pur mantenendo un ambiente ibrido uomo-robot.

Nel prossimo futuro, è probabile che il focus si sposterà dall’HRI (human-robot interaction) al tema dell’affidabilità e il fleet management automatizzato, quando le soluzioni diventeranno più affidabili e versatili; infatti, in una vera fabbrica dark, infatti, i robot dovrebbero coordinarsi autonomamente, in collaborazione con i sistemi informativi. I risultati rivelano la necessità di fare ancora progressi su vari fronti, tra cui la sicurezza stessa dei robot, la robustezza dei software AI, oltre alla completa connettività e integrazione dei flussi informativi. Ad oggi le condizioni appena citate non sono ancora irrealistiche o solo parzialmente realistiche, e infatti, nemmeno i leader tecnologici hanno stabilimenti totalmente automatizzati [172]. Nel lungo termine, invece, si punta ad una maggiore autonomia decisionale dei robot e una riduzione progressiva dell’intervento umano diretto. Questo non significa, come già spiegato, eliminare il ruolo umano, ma più che altro spostarlo verso livelli diversi. A livello management questo si traduce nella necessità di bilanciare l’ottimizzazione immediata con la preparazione al futuro, investendo in open-platform

aggiornabili, assicurandosi la raccolta dei dati di produzione e contemporaneamente sviluppando le competenze necessarie in-house e in anticipo. In pratica, l'idea di dark factory serve come bussola, meta a cui tendere, ma il percorso deve essere graduale.

7.4 Rischi sociali e considerazioni finali

Come già anticipato, l'introduzione di robot umanoidi nelle imprese sviluppa una serie di temi sul piano occupazionale, organizzativo e sociale.

In prima battuta, l'effetto sul livello di occupazione può essere considerevole perché nonostante nel medio periodo i nuovi ruoli possano controbilanciare il numero di quelli rimpiazzati [174], lo stesso non è certo che avvenga a livello locale o aziendale, facendo sì che programmi di reskilling, non sempre immediati, diventino necessari. Sulla stessa tendenza, anche le relazioni industriali possono risentirne, infatti, qualora l'operatore percepisse la sua “sostituibilità” potrebbe risentirne a livello, ad esempio, di morale basso. Terzo, le percezioni psicologiche verso gli humanoidi, influenzate dal fenomeno della Uncanny Valley, richiede che gli si dedichi attenzione, per evitare aspettative irrealistiche o paure infondate [177]. Infine, nascono, con questi scenari, questioni etiche legate alla crescente autonomia decisionale delle macchine, che richiedono attenzione a trasparenza, responsabilità e condivisione paritaria dei benefici.

Tutto ciò in modo da ricordare che l'adozione degli humanoidi non rappresenta soltanto un'evoluzione a livello tecnologico, ma un vero e proprio processo di trasformazione socio-organizzativa, che sarà di successo, tra le altre cose, se verranno gestiti i rischi sociali oltre alle prestazioni tecniche.

7.5 Limiti dello studio e sviluppi futuri

Come ogni lavoro di ricerca, anche questa tesi presenta limitazioni di cui è importante discutere, e dalle quali derivano occasioni per approfondimenti in futuro. Un primo punto riguarda la disponibilità dei dati e la generalizzabilità dei risultati.

L'analisi del capitolo 5 ha avuto il focus su un caso specifico di introduzione di un umanoide in una linea di assemblaggio di motori elettrici. Nonostante si siano utilizzati dati industriali realistici e ipotesi coerenti con le fonti, la validità esterna dei risultati potrebbe essere limitata. Parametri come il ROI o l'impatto sulla produttività potrebbero essere diversi in maniera sensibili per altri settori o in imprese di dimensioni diverse, perciò, i numeri ottenuti vanno interpretati come utili per contesti simili a quello preso come esempio e solo a scopo intuitivo per settori diversi. Un secondo limite è la maturità tecnologica attuale degli humanoidi; infatti, alcune conclusioni

prospettive sono state dedotte assumendo che AI e hardware subiscano rapidi balzi evolutivi tecnologicamente in pochi anni [169]. In realtà, ad oggi (2025) sussistono ancora alcune limitazioni pratiche legate ad autonomia energetica, fragilità meccaniche, affidabilità non paragonabile a robot industriali tradizionali su alcuni task. Questo significa che alcune raccomandazioni (es. impiegare umanoidi in ambienti altamente variabili) andrebbero rivalutate, almeno per ora, verificando solo più in prossimità dell'implementazione se la tecnologia ha colmato il divario promesso. In caso contrario, si rischia di sovrastimare alcuni fattori e sottostimarne altri. Un terzo limite riguarda le assunzioni semplificative adottate nella modellazione dello scenario ipotetico; infatti, nella realtà, potrebbero emergere voci di costo impreviste non considerati esplicitamente nei calcoli attuali. Analogamente, si è assunto che l'efficienza del robot resti costante nel tempo, mentre potrebbe avere un andamento a campana, per via di curve di apprendimento iniziali e di usura finale. Queste assunzioni, utili per delimitare la casistica dello studio, diventano punti da tenere presenti nella lettura dei risultati. Infine, va segnalato che non tutti gli impatti sono stati misurati quantitativamente; ad esempio, i benefici in ergonomici e di sicurezza per i lavoratori sono stati discussi in maniera qualitativa ma non inseriti nel ROI, anche se molto rilevanti nella decisione complessiva di un progetto simile. Questa scelta metodologica (focalizzarsi su indicatori economici diretti) potrebbe sottostimare la capacità dell'investimento di essere attrattivo in ottica più generale di sostenibilità della soluzione tecnologica. In sintesi, i limiti appena nominati voglio suggerire prudenza nella lettura e richiedono una contestualizzazione ad-hoc, oltre ad ulteriori ricerche per andare a far luce sulle zone ad ora rimaste grige.

Alla luce di quanto appena detto, si propone una lista di consigli per il lavoro futuro sull'argomento:

- **Studi a lungo termine in ambiente produttivo reale:** monitorare nel tempo (mesi o anni) l'evoluzione delle performance e degli impatti dopo l'introduzione di un robot umanoide in linea. Nel caso sviluppato nel cap.5 è stato valutato il delta iniziale tra as-is e to-be, ma non l'andamento nel tempo e come maturi il piano implementato. Registrare questo tipo di dati fornirebbe informazioni preziose sulla sostenibilità di lungo periodo di queste soluzioni.
- **Benchmark tra piattaforme su processi reali:** potrebbe risultare utile organizzare test e misurazioni mettendo a confronto piattaforme diverse (e.g. umanoide vs. mobile manipulator vs. cobot fisso) su uno stesso task industriale o su un processo intero,

misurando le differenze in prestazioni, costi e requisiti. Va però anche detto che è poi l'intero ecosistema robotico industriale implementato complessivamente in un progetto a permettere una valutazione accurata dell'innovazione e non un suo solo singolo elemento.

- **Analisi dettagliate del TCO e scenari di costo:** essendo che alcuni costi e benefici indiretti non sono stati pienamente quantificati, un futuro lavoro potrebbe essere quello di costruire un modello di Total Cost of Ownership che compari le varie soluzioni comprendendo anche le voci di costo nascoste come training iniziale, integrazione software, aggiornamenti futuri, smaltimento a fine vita, applicandolo poi a vari tipi di PMI e di processi. Non si parla solo di voci di costo negative; infatti, si potrebbe includere nel calcolo anche le esternalità positive difficilmente quantificabili in termini monetari così da offrire una visione più completa del valore dall'automazione umanoide. Ulteriore estensione di questo aspetto potrebbe essere l'esplorazione dell'analisi economico-finanziaria anche dei modelli di Robot-as-a-Service in maniera più approfondita e quantitativa.

In conclusione, questo documento ha esplorato tramite un approccio sistematico l'opportunità che offre il robot umanoide, con un focus sulle PMI manifatturiere, cercando di mettere in evidenza i trade-off tecnologici, economici e organizzativi rispetto alle alternative. Da un punto di vista pratico, il lavoro fornisce un riferimento concreto, basato su dati raccolti da un ambiente informativo legato a questi aspetti piuttosto caotico e collegato a esperienze industriali recenti, con lo scopo di valutare progetti di automazione avanzata ognuno nella propria realtà. In definitiva, si auspica che quanto emerso da questa ricerca possa sia orientare scelte immediate nelle PMI italiane, sia alimentare una più ampia riflessione sulla direzione in cui tecnologia e lavoro stanno convergendo.

Quanto visto, quindi, racconta una situazione dove i robot umanoidi, non devono essere interpretati come il nucleo tecnologico della fabbrica del futuro, bensì come il catalizzatore di transizione capace di abilitare il passaggio dall'attuale stato dell'arte, ancora piuttosto umano-centrico e disomogeneo, in direzione di modelli di produzione sempre più autonomi, integrati e lights-out. Si ribadisce quindi che la vera forza dell'umanoide non sta tanto nell'essere la destinazione ultima dell'automazione, quanto nel servire da ponte evolutivo tra le tecnologie di oggi e la piena automazione industriale generale del prossimo futuro; quindi, una tecnologia intermedia capace di rendere praticabile, sostenibile e socialmente accettabile la trasformazione che porterà la manifattura verso un nuovo equilibrio tra uomo, macchina e AI.

8. Bibliografia e Fonti

- [1] «World Robotics 2023 Report: Asia ahead of Europe and the Americas - International Federation of Robotics». [Online]. Disponibile su: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas>
- [2] «Robot umanoidi: ecco che cosa sanno fare ORA e come evolveranno». Consultato: 28 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.agendadigitale.eu/industry-4-0/robot-umanoidi-ai-e-automazione-integrate-le-applicazioni-pratiche/>
- [3] «The global market for humanoid robots could reach \$38 billion by 2035». Consultato: 25 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.goldmansachs.com/insights/articles/the-global-market-for-robots-could-reach-38-billion-by-2035>
- [4] P. Hanbury, A. Dutt, e E. Veratti, «Humanoid Robots at Work: What Executives Need to Know», Bain. Consultato: 25 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.bain.com/insights/humanoid-robots-at-work-what-executives-need-to-know/>
- [5] C. Casadei, «Robot umanoidi e Ai miglioreranno la sicurezza di 3 milioni di addetti della filiera della costruzione», Il Sole 24 ORE. Consultato: 28 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.ilsole24ore.com/art/robot-umanoidi-e-miglioreranno-sicurezza-3-milioni-addetti-filiera-costruzioni-AH33nkFB>

- [6] W.-Y. Lee, «Exclusive: Nvidia, Foxconn in talks to deploy humanoid robots at Houston AI server making plant», *Reuters*, 20 giugno 2025. Consultato: 15 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.reuters.com/world/china/nvidia-foxconn-talks-deploy-humanoid-robots-houston-ai-server-making-plant-2025-06-20/>
- [7] «IFR World Robotics 2023 Key Takeaways». [Online]. Disponibile su: <https://statzon.com/insights/ifr-world-robotics-2023>
- [8] «Siemens advances autonomous production with new AI and robotics capabilities for automated guided vehicles | Press | Company | Siemens». [Online]. Disponibile su: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-advances-autonomous-production-new-ai-and-robotics-capabilities-automated>
- [9] «IFR presents World Robotics 2021 reports - International Federation of Robotics». [Online]. Disponibile su: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robot-sales-rise-again>
- [10] A. Kheddar *et al.*, «Humanoid Robots in Aircraft Manufacturing: The Airbus Use Cases», *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 26, fasc. 4, pp. 30–45, dic. 2019, doi: 10.1109/mra.2019.2943395.
- [11] «Robotics Outlook 2030: How Intelligence and Mobility Will Shape the Future», BCG Global. Consultato: 25 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.bcg.com/publications/2021/how-intelligence-and-mobility-will-shape-the-future-of-the-robotics-industry>
- [12] «ARK Invest Europe | Robot umanoidi: la prossima opportunità da 26 trilioni di dollari». [Online]. Disponibile su: <https://europe.ark-funds.com/it/2025/03/humanoid-robotics-and-the-next-frontier-of-automation/>
- [13] «2025 Manufacturing Industry Outlook», Deloitte Insights. Consultato: 25 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/manufacturing-industrial-products/manufacturing-industry-outlook.html>
- [14] «Indagine Confindustria sul lavoro del 2024». Consultato: 30 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.confindustria.it/pubblicazioni/indagine-confindustria-sul-lavoro-del-2024/>
- [15] «Global Automotive Supplier Study: Average industry profit margin drops to just 4.7%», <https://www.lazard.com>. Consultato: 25 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.lazard.com/news-announcements/global-automotive-supplier-study-average-industry-profit-margin-drops-to-just-47/>
- [16] «Industria. RoBee è il robot (made in Brianza) capace di fare i lavori pesanti». Consultato: 6 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.avvenire.it/economia/pagine/il-caso-robeel-robot-brianzolo-addetto-a-compiti>
- [17] «Rivoluzione industriale - Wikipedia». [Online]. Disponibile su: https://it.wikipedia.org/wiki/Rivoluzione_industriale
- [18] «When Lean Meets Industry 4.0 Next Level Operational Excellence». [Online]. Disponibile su: <https://www.bcg.com/publications/2017/lean-meets-industry-4.0>
- [19] «Industry 5.0 - European Commission». [Online]. Disponibile su: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en
- [20] M. T. Islam, K. Sepanloo, S. Woo, S. H. Woo, e Y. J. Son, «A Review of the Industry 4.0 to 5.0 Transition: Exploring the Intersection, Challenges, and Opportunities of Technology and Human–Machine Collaboration», *Machines*, vol. 13, fasc. 4. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), aprile 2025. doi: 10.3390/machines13040267.
- [21] «Breve storia della robotica, da Unimate ai giorni nostri - AI4Business». [Online]. Disponibile su: <https://www.ai4business.it/robotica/piccola-storia-della-robotica-da-unimate-ai-giorni-nostri/>
- [22] «Now the robot gets a grip on things - International Federation of Robotics». [Online]. Disponibile su: <https://ifr.org/news/now-the-robot-gets-a-grip-on-things/>
- [23] «Amazon Robotics deploys these 9 robots across its operations globally». [Online]. Disponibile su: <https://www.aboutamazon.com/news/operations/amazon-robotics-robots-fulfillment-center>
- [24] «Robots In The Enterprise: Why Adoption Is Crucial, Yet Lagging». [Online]. Disponibile su: <https://www.forbes.com/councils/forbestechcouncil/2024/09/23/robots-in-the-enterprise-why-adoption-is-crucial-yet-lagging/>
- [25] «3 tailwinds for robotics adoption in 2024 and beyond | EY - Global». [Online]. Disponibile su: https://www.ey.com/en_gl/insights/innovation/three-tailwinds-for-robotics-adoption-in-2024-and-beyond
- [26] «Sicurezza robotica: cosa cambia con le nuove norme ISO 10218:2025 – WIDE Automation». [Online]. Disponibile su: <https://www.wideautomation.com/sicurezza-robotica-cosa-cambia-con-le-nuove-norme-iso-102182025/>
- [27] «Worldwide - projected collaborative robot sales 2025| Statista». [Online]. Disponibile su: <https://www.statista.com/statistics/748128/estimated-collaborative-robot-sales-worldwide/>
- [28] «Industrial Engineering Knowledge Center: Robots in Tesla's Plants - Case Study». [Online]. Disponibile su: <https://nraoiekc.blogspot.com/2022/07/robots-in-teslas-plants-case-study.html>
- [29] «BMW tests Figure 02 humanoid on production line». [Online]. Disponibile su: <https://www.therobotreport.com/bmw-tests-figure-02-humanoid-on-production-line/>
- [30] H. Ghelani, «Enhancing PCB Quality Control through AI-Driven Inspection: Leveraging Convolutional Neural Networks for Automated Defect Detection in Electronic Manufacturing Environments», 2024. [Online]. Disponibile su: <https://ijacti.com/index.php/Journal>
- [31] Q. A. Al-Haija, «Editorial: Artificial intelligence solutions for decision making in robotics», *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 11. Frontiers Media SA, 2024. doi: 10.3389/frobt.2024.1389191.
- [32] C. Lyu, C. Dong, Q. Xiong, Y. Chen, Q. Weng, e Z. Chen, «Pathfinder: Deep Reinforcement Learning-Based Scheduling for Multi-Robot Systems in Smart Factories with Mass Customization», *Comput. Mater. Contin.*, vol. 0, fasc. 0, pp. 1–10, 2025, doi: 10.32604/cmc.2025.065153.
- [33] «Save costs with the AI predictive maintenance function for our industrial robots - Mitsubishi Electric Factory Automation - Germany». [Online]. Disponibile su: https://de.mitsubishielectric.com/fa/de_en/lp/roboer-ki/predictive-maintenance
- [34] «Industry Insights: A3 Industry Insights: Should Manufacturers Turn Off The Lights?» [Online]. Disponibile su: <https://www.automate.org/industry-insights/should-manufacturers-turn-off-the-lights>

- [35] S. Afrin *et al.*, «Industrial Internet of Things: Implementations, challenges, and potential solutions across various industries», *Computers in Industry*, vol. 170. Elsevier B.V., settembre 2025. doi: 10.1016/j.compind.2025.104317.
- [36] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, e C. Barlow, «Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952–108971, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
- [37] S.-W. Lin *et al.*, «Digital Twin and IIoT in Optimizing Manufacturing Process and Quality Management Digital Twin and IIoT in Optimizing Manufacturing Process and Quality Management-2-CCONTENTS». [Online]. Disponibile su: https://www.iiconsortium.org/pdf/IIC_Digital_Twins_Industrial_Apps_White_Paper_2020-02-18.pdf
- [38] «Transforming manufacturing with digital twins | McKinsey». [Online]. Disponibile su: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-next-frontier-of-factory-optimization>
- [39] «Siemens and the digital factory of the future, powered by NavVis». Consultato: 25 ottobre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.navvis.com/resources/case-studies/siemens>
- [40] «(860) BMW Factory Humans & Robots Work Together At Dingolfing Plant - YouTube». [Online]. Disponibile su: <https://www.youtube.com/watch?v=Dm3Nyb2lCvs>
- [41] «Navigating the Industrial Metaverse: A Blueprint for Future Innovations M A R C H 2 0 2 4 In collaboration with Accenture», 2024.
- [42] F. C. Andriulo, M. Fiore, M. Mongiello, E. Traversa, e V. Zizzo, «Edge Computing and Cloud Computing for Internet of Things: A Review», *Informatics*, vol. 11, fasc. 4. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), dicembre 2024. doi: 10.3390/informatics11040071.
- [43] «KUKA Case study: human-robot-collaboration at Siemens | KUKA AG». [Online]. Disponibile su: <https://www.kuka.com/en-us/industries/solutions-database/2016/07/solution-robotics-siemens>
- [44] «Lights-Out Manufacturing». [Online]. Disponibile su: <https://www.amtonline.org/article/lights-out-manufacturing>
- [45] «BMW tests Figure 02 humanoid on production line». Consultato: 3 novembre 2025. [Online]. Disponibile su: https://www.therobotreport.com/bmw-tests-figure-02-humanoid-on-production-line/?utm_source=chatgpt.com
- [46] «Humanoid Robots for BMW Group Plant Spartanburg». Consultato: 3 novembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2024/humanoid-robots.html>
- [47] «OSSERVATORIO ECONOMIA REGIONALE NOTA FLASH SUL COMMERCIO ESTERO IN EMILIA-ROMAGNA NEL 2023 MARZO 2024 ECONOMIA EXPORT IMPORT COMPETITIVITÀ Dati di sintesi».
- [48] «COMMERCIO ESTERO PIEMONTESE: IL 2023 SI CHIUDE CON UNA CRESCITA DELLE VENDITE OLTRE CONFINE DEL 9,1%».
- [49] «Osservatorio economico».
- [50] «Piemonte is Automotive. (n.d.). Ceipiemonte.» [Online]. Disponibile su: <https://www.centroestero.org/en/invest-in-piemonte/98-services/services-invest-in-piemonte/513-piemonte-is-automotive.html>
- [51] «PIEMONTE AGENCY». [Online]. Disponibile su: <https://www.eacp-aero.eu/members/piemonte-agency/#:~:text=Number%20of%20employees%20of%20all,aerospace%20actors>
- [52] «Imprese, export Emilia-Romagna da record: 85,1 miliardi nel 2023», mar. 2024, [Online]. Disponibile su: https://parma.bologna.repubblica.it/cronaca/2024/03/15/news/impresa_export_emilia-romagna_da_record_851_miliardi_nel_2023-422313652#:~:text=L%27Emilia,396%20euro
- [53] «InvestInEmiliaRomagna». [Online]. Disponibile su: [https://www.investinemiliaromagna.eu/sectors/key-sectors-overview#:~:text="](https://www.investinemiliaromagna.eu/sectors/key-sectors-overview#:~:text=)
- [54] «Macchine per il packaging: il fatturato totale sale a 8,53 miliardi», [Online]. Disponibile su: <https://packagingspeaksgreen.com/it/eventi/macchine-il-packaging-il-fatturato-totale-sale-853-miliardi>
- [55] U. E.-R.-R. Emilia-Romagna, «Rapporto 2023 sull'economia regionale».
- [56] F. Aggogeri, N. Pellegrini, e C. Taesi, «Towards Industrial Robots' Maturity: An Italian Case Study», *Robotics*, vol. 13, fasc. 3, mar. 2024, doi: 10.3390/robotics13030042.
- [57] «Italy Robotic Humanoid Market Report- Q1 2025». [Online]. Disponibile su: <https://www.reportlinker.com/dlp/cb12ab506b0e79c18bd875bb7a985991#:~:text=Healthcare%20Integration%20of%20HUMANOID%20Robots>
- [58] «La Roadmap del Cluster Fabbrica Intelligente presentata a Roma». [Online]. Disponibile su: <https://www.elettronica-av.it/en/roadmap-del-cluster-fabbrica-intelligente-presentata-a-roma/#:~:text=La%20Roadmap%20del%20Cluster%20Fabbrica,Gruppi%20tematici>
- [59] «HD Hyundai invests in humanoid robots to solve labour shortage», Lloyd's List. Consultato: 15 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.lloydslist.com/LL1154086/HD-Hyundai-invests-in-humanoid-robots-to-solve-labour-shortage>
- [60] «(13) Pubblica | LinkedIn». Consultato: 15 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: https://www.linkedin.com/posts/jeffcooper_300-million-humanoid-robots-are-coming-activity-7341099988812263425-b0t-/
- [61] «Robot umanoidi e Ai migliorano la sicurezza di 3 milioni di addetti della filiera della costruzioni - Il Sole 24 ORE». Consultato: 15 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.ilsole24ore.com/art/robot-umanoidi-e-migliorano-sicurezza-3-milioni-addetti-filiera-costruzioni-AH33nkFB>
- [62] «Welding robots to replace humans in HD Hyundai's shipyards by 2027». Consultato: 15 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://koreajoongangdaily.joins.com/news/2025-05-08/business/industry/Welding-robots-to-replace-humans-in-HD-Hyundai-s-shipyards-by-2027/2302697>
- [63] *Shaping the Future of Learning: The role of AI in Education 4.0 : Insight Report*. 2024.
- [64] European Agency for Safety and Health at Work., IKEI., e Panteia., *Work-related musculoskeletal disorders: prevalence, costs and demographics in the EU*. LU: Publications Office, 2019. Consultato: 15 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://data.europa.eu/doi/10.2802/66947>

- [65] M. Mazzetto, M. Teixeira, É. O. Rodrigues, e D. Casanova, «Deep Learning Models for Visual Inspection on Automotive Assembling Line», *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.*, vol. 7, fasc. 3, pp. 473–494, 2020, doi: 10.22161/ijaers.74.56.
- [66] «Boeing Slows for Inspection | Cornerstone Inspection & Thermal». [Online]. Disponibile su: <https://www.cornerstonendt.com/boeing-slows-production-for-inspection/>
- [67] J. M. Smith, «Title: Concept Development of an Automated Shim Cell for F-35 Forward», 2011.
- [68] «News - COMPOSITE ALLIANCE GROUP». [Online]. Disponibile su: <https://www.compositealliancegroup.com/news/>
- [69] «Case Study: Automatic Inline Label Inspection System for Pharmaceutical Packaging | Visionify Case Study». [Online]. Disponibile su: <https://visionify.ai/case-studies/automatic-inline-label-inspection-system-case-study>
- [70] «Reduce Waste & Increase Efficiency in Clean-in-Place Processes». [Online]. Disponibile su: <https://www.emersonautomationexperts.com/2022/discrete-automation/reduce-waste-increase-efficiency-in-clean-in-place-processes/>
- [71] «Challenges of Global Track and Trace in the Pharma Industry - Nubinno». [Online]. Disponibile su: <https://nubinno.com/challenges-of-global-track-and-trace-in-the-pharma-industry/>
- [72] «Boost Electronics Manufacturing with Predictive Maintenance & Automation». [Online]. Disponibile su: <https://www.flatworldedge.com/blog/boost-electronics-manufacturing-predictive-maintenance-automation/>
- [73] «SINUMERIK CNC automation system». [Online]. Disponibile su: <https://www.siemens.com/us/en/products/automation/systems/sinumerik-cnc.html>
- [74] «Automation at Nestle brings back baby food line | Packaging World». [Online]. Disponibile su: <https://www.packworld.com/leaders-new/machinery/feeding-inserting-unscrambling/article/13364608/automation-at-nestle-brings-back-baby-food-line>
- [75] «Palletizing for the palate_Case Study_Orkla Foods_USL».
- [76] «Remaking an efficient, ROI-driven manufacturing workforce | McKinsey». Consultato: 25 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/investing-in-the-manufacturing-workforce-to-accelerate-productivity>
- [77] «3 Steps to Help Attract and Retain Skilled Manufacturing Talent | Travelers Insurance». Consultato: 25 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.travelers.com/resources/business-industries/manufacturing/help-attract-and-retain-skilled-manufacturing-talent>
- [78] «United States Average Hourly Wages in Manufacturing». Consultato: 25 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://tradingeconomics.com/united-states/wages-in-manufacturing>
- [79] «Productivity and Costs by Industry: Manufacturing and Mining Industries News Release - 2024 A01 Results», Bureau of Labor Statistics. Consultato: 26 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.bls.gov/news.release/prin.htm>
- [80] «Service Robot Market: Trends, Growth, and Future Outlook». Consultato: 26 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://statzon.com/insights/humanoid-helpers-and-beyond-service-robot-market-expansion>
- [81] «xROI ICAREX_RoboticaUmanoide_ITA_compressed».
- [82] CNBC International, *Why are we so obsessed with making human-like robots?*, (3 ottobre 2024). Consultato: 15 luglio 2025. [Online Video]. Disponibile su: <https://www.youtube.com/watch?v=5BppVvsoZ3s>
- [83] A. Dixit, «How AI-powered humanoid robots are changing auto manufacturing at BMW, Tesla, and Mercedes-Benz». Consultato: 15 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/automation/how-ai-powered-humanoid-robots-are-changing-auto-manufacturing-at-bmw-tesla-and-mercedes-benz/304574>
- [84] M. Stone, «Logistics giant GXO is going big on humanoid robots», Business Insider. Consultato: 15 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.businessinsider.com/gxo-brings-humanoid-robots-to-warehouses-2025-4>
- [85] «ewi.org/wp-content/uploads/2018/12/Garman_Understanding_Collaborative_Robot_Safety.pdf#:~:text=Based on current safety standards, robot and human can perform». Consultato: 30 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: https://ewi.org/wp-content/uploads/2018/12/Garman_Understanding_Collaborative_Robot_Safety.pdf
- [86] «Explanation of R15.08 - Safety Standard for Autonomous Mobile Robots (AMR)». Consultato: 30 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.agvnetwork.com/r15-08-safety-amr>
- [87] heise online, «Apptronik Apollo: Mercedes-Benz will humanoide Roboter einsetzen», heise online. Consultato: 5 ottobre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.heise.de/news/Apptronik-Apollo-Mercedes-Benz-will-humanoide-Roboter-einsetzen-9658165.html>
- [88] «swira.se/wp-content/uploads/2025/08/Position_Paper_HUMANOID_ROBOTS_by_IFR_V01.pdf#:~:text=A humanoid robot is a, interacting with humans and environments». Consultato: 30 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: https://swira.se/wp-content/uploads/2025/08/Position_Paper_HUMANOID_ROBOTS_by_IFR_V01.pdf
- [89] «Humanoid Robots: “Vision and Reality” Position Paper». Consultato: 30 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.automation.com/en-us/articles/august-2025/humanoid-robots-vision-reality-position-paper>
- [90] I. I. F. of Robotics, «International Federation of Robotics», IFR International Federation of Robotics. Consultato: 30 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://ifr.org/industrial-robots>
- [91] I. I. F. of Robotics, «VDA 5050 explained», IFR International Federation of Robotics. Consultato: 30 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://ifr.org/post/vda-5050-explained>
- [92] O. R. S. S. Benefit, «RoBee R: Industrial Humanoid Robot with Cognitive AI – Oversonic Robotics». Consultato: 6 ottobre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.oversonicrobotics.com/robee-r/>
- [93] «‘There are problems facing humanity we can’t solve – our robots could offer a solution’: Sanctuary AI CEO Geordie Rose». Consultato: 5 ottobre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.imeche.org/news/news-article/there-are-problems-facing-humanity-we-can-t-solve-our-robots-could-offer-a-solution-sanctuary-ai-ceo-geordie-rose>
- [94] I. I. F. of Robotics, «TOP 5 Global Robotics Trends 2025», IFR International Federation of Robotics. Consultato: 10 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/top-5-global-robotics-trends-2025>

- [95] A. Pasha, «Lights-Out Manufacturing: Revolutionizing the Factory Floor with Automation». [Online]. Disponibile su: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/digital-disruption/harnessing-automation>
- [96] «Dark Factories: The Automated Revolution Reshaping Manufacturing | stellarix». [Online]. Disponibile su: <https://stellarix.com/insights/blogs/dark-factories-the-automated-revolution-reshaping-manufacturing/>
- [97] «La Rivoluzione della “Dark Factory” di Xiaomi: Un Nuovo Capitolo nella Produzione Automatizzata - Rivista AI». [Online]. Disponibile su: <https://www.rivista.ai/2024/07/10/la-rivoluzione-della-dark-factory-di-xiaomi-un-nuovo-capitolo-nella-produzione-automatizzata/>
- [98] «Produzione a luci spente: dalla fantascienza alla mossa intelligente di oggi». [Online]. Disponibile su: <https://www.themanufacturer.com/articles/lights-out-manufacturing-from-sci-fi-fantasy-to-todays-smart-move/>
- [99] «Produzione a luci spente: il futuro della produzione Blog». [Online]. Disponibile su: <https://www.euautomation.com/en/knowledge-hub/read/blogs/how-bright-is-the-future-of-automation>
- [100] R. Wang, Y. Tong, e C. Zhuang, «Lights-out factories: Review and prospect», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. SAGE Publications Ltd, 2024. doi: 10.1177/09544054241305826.
- [101] A. Grybauskas, A. Stefanini, e M. Ghobakhloo, «Social sustainability in the age of digitalization: A systematic literature Review on the social implications of industry 4.0», *Technol. Soc.*, vol. 70, ago. 2022, doi: 10.1016/j.techsoc.2022.101997.
- [102] C. E. HEPAKTAN e D. ŞİMŞEK, «Industry 4.0 and the Future of the Labor Market», *İzmir Sos. Bilim. Derg.*, vol. 4, fasc. 2, pp. 80–88, dic. 2022, doi: 10.47899/ijss.1174005.
- [103] «Le Dark Factory: Rivoluzione nel settore manifatturiero». [Online]. Disponibile su: <https://www.andreaviliotti.it/post/le-dark-factory-rivoluzione-nel-settore-manifatturiero>
- [104] «Liability for AI-Generated Defective Manufacturing - Attorney Aaron Hall». [Online]. Disponibile su: <https://aaronhall.com/liability-for-ai-generated-defective-manufacturing/>
- [105] «Robot umanoidi, nuova frontiera dell’AI: ecco che sanno fare». [Online]. Disponibile su: <https://www.agendadigitale.eu/industry-4-0/robot-umanoidi-ai-e-automazione-integrate-le-applicazioni-pratiche/#:~:text=I%20robot%20umanoidi%20combinano%20intelligenza,autonomamente%20a%20vari%20contesti%20operativi>
- [106] «Innovazione: dalla sanità al manifatturiero, il primo robot umanoide Made in Italy entra in azione». [Online]. Disponibile su: <https://www.lombardiaspeciale.regione.lombardia.it/wps/portal/LS/Home/News/Dettaglio-News/2024/03-marzo/innovazione-dalla-sanita-al-manifatturiero-il-primo-robot-umanoide-made-in-italy-entra-in-azione#:~:text=match%20at%20L160%20applicativi%3A%20al,catene%20produttive%2C%20delle%20fasi%20di>
- [107] «NPI: New Product Introduction | Var Industries». Consultato: 30 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://varindustries.vargroup.com/soluzioni/digital-manufacturing/npi-new-product-introduction>
- [108] hype+d3v, «IL FUTURO DEL MONTAGGIO: TRA NUOVE TECNOLOGIE E NUOVE PROGETTAZIONI», Aepi Group. Consultato: 30 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://aepi-group.it/il-futuro-del-montaggio-tra-nuove-tecnologie-e-nuove-progettazioni/>
- [109] «diim.unict.it/users/costa/IntroAL.pdf». Consultato: 30 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <http://www.diim.unict.it/users/costa/IntroAL.pdf>
- [110] «LA+RI-PROGETTAZIONE+DI+LINEE+DI+ASSEMBLAGGIO+IN+OTTICA+LEAN+PRODUCTION».
- [111] «Studio del ciclo e della linea di montaggio per l’industrializzazione del motore Piaggio M648».
- [112] «Metalmeccanici: costo medio lavoro 2023», Fisco e Tasse. Consultato: 30 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.fiscoetasse.com/rassegna-stampa/32850-metalmeccanici-costo-medio-lavoro-2023.html>
- [113] «Human Error: A Persistent Challenge in Manufacturing Operations! - Plutomen». Consultato: 30 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://pluto-men.com/human-error-persistent-challenge-manufacturing-operations/>
- [114] A. Saptari, J. Leau, P. K. Ng, e E. Mohamad, «Human Error and Production Rate Correlation in Assembly Process of Electronics Goods», *Proc. 24th Jpn. Soc. Mech. Eng. JSME Des. Syst. Conf.*, vol. 24, pp. 1–6, set. 2014, doi: 10.1299/jsmedsd.2014.24_2309-1_.
- [115] A. ANSA, «Confindustria, “il tasso di assenteismo al 6,6% nel 2023” - PMI - Ansa.it», Agenzia ANSA. Consultato: 30 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: https://www.ansa.it/sito/notizie/economia/pmi/2024/08/05/confindustria-il-tasso-di-assenteismo-al-66-nel-2023_fb045d85-7f53-4371-8c8a-b00d8451c0f4.html
- [116] S. Shibu, «Figure 02 Humanoid Robot Steps Into BMW Factories For Test», Entrepreneur. Consultato: 30 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.entrepreneur.com/business-news/figure-02-humanoid-robot-steps-into-bmw-factories-for-test/478107>
- [117] P. M. S.- iFactory, «Figure AI vs Digit vs Apollo: How iFactoryapp AI Connects the Humanoid Robots in Manufacturing». Consultato: 30 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://ifactoryapp.com/blog/figure-ai-digit-apollo-comparison-ifactoryapp-ai-humanoid-robots-indian-manufacturing-sector>
- [118] «Robots and humans can work together with new ISO guidance», ISO. Consultato: 1 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.iso.org/news/2016/03/Ref2057.html>
- [119] «Come i robot delle catene di montaggio riducono i costi senza sacrificare la qualità - EVS Robot». Consultato: 1 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.evsint.com/it/how-assembly-line-robots-cut-costs-without-sacrificing-quality/>
- [120] «Impatto della robotica nella produzione: robot di assemblaggio che guidano la produttività - Robot EVS». Consultato: 1 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.evsint.com/it/impact-of-robotics-in-manufacturing-assembly-robots-driving-productivity/>
- [121] «I robot FANUC aumentano la capacità di palletizzazione dell’impianto di produzione di farina». Consultato: 1 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.fanuc.eu/it-it/casi-di-studio/i-robot-fanuc-aumentano-la-capacita-di-palletizzazione-dell'impianto-di-produzione>

- [122] «Caso di studio sulle linee di produzione robotizzate nel tondino per cemento armato per tunnel - EVS Robot». Consultato: 1 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.evsint.com/it/case-study-on-robotic-production-lines-in-tunnel-rebar/>
- [123] «Intelligenza Artificiale e Machine Learning Automazione industriale». Consultato: 30 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.progeleonardo.com/it/blog/intelligenza-artificiale-e-machine-learning-industria>
- [124] P. Barosz, G. Golda, e A. Kampa, «Efficiency Analysis of Manufacturing Line with Industrial Robots and Human Operators», *Appl. Sci.*, vol. 10, fasc. 8, Art. fasc. 8, gen. 2020, doi: 10.3390/app10082862.
- [125] @PatentPC, «Robotics Maintenance Costs: Operating Efficiency Data», PatentPC. Consultato: 1 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://patentpc.com/blog/robotics-maintenance-costs-operating-efficiency-data>
- [126] Y. Wang, *Humanoid Robots 2025-2035: Technologies, Markets and Opportunities*. 2025. Consultato: 1 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.idtechex.com/en/research-report/humanoid-robots/1093>
- [127] «How much do robots cost? 2025 price breakdown - Standard Bots». Consultato: 1 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://standardbots.com/blog/how-much-do-robots-cost>
- [128] K. Wolfenstein, «Un'analisi di mercato e una panoramica dei robot umanoidi con un carico utile di 10 kg o più, per opzioni di acquisto e noleggio», Xpert.Digital. Consultato: 3 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://xpert.digital/it/robot-umanoidi-con-una-capacita-di-carico-di-10-kg-o-piu/>
- [129] «Metalmeccanici: costo medio lavoro 2023 - FISCOeTASSE.com». Consultato: 30 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.fiscoetasse.com/rassegna-stampa/32850-metalmeccanici-costo-medio-lavoro-2023.html>
- [130] «OEE, cos'è? Esempi pratici di come implementarlo». Consultato: 1 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.headvisor.it/oee-lean-production>
- [131] R. Alzarating, «Robot Umanoidi: Decisione Strategica Aziendale», Alzarating. Consultato: 3 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.alzarating.com/robot-umanoidi/>
- [132] «Margine del distributore per settore e calcolo del markup al dettaglio». Consultato: 3 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://exporteers.com/it/distributor-margin/>
- [133] A. Viliotti, «ROI di AI e robotica: guida completa al calcolo del ritorno degli investimenti tecnologici», Andrea Viliotti. Consultato: 4 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.andreaviliotti.it/post/roi-di-ai-e-robotica-guida-completa-al-calcolo-del-ritorno-degli-investimenti-tecnologici>
- [134] «Ritorno sull'investimento come calcolare e interpretare il ROI», FasterCapital. Consultato: 5 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://fastercapital.com/it/contenuto/Ritorno-sull-investimento--come-calcolare-e-interpretare-il-ROI.html>
- [135] «Stima del costo del capitale di rischio».
- [136] «Digit by Agility Robotics – \$250,000 Bipedal Robot for Warehouse Automation - FUTUROBOTS». Consultato: 30 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.futurobots.com/agility-robotics-digit-warehouse-robot-review/>
- [137] IterUser, «INCENTIVI Piano di Transizione 4.0 2021», Iter Innovation. Consultato: 7 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.iterinformatica.it/piano-transizione-40/>
- [138] «Credito d'imposta per investimenti in beni strumentali», mimit.gov.it. Consultato: 7 agosto 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.mimit.gov.it/it/incentivi/credito-dimposta-per-investimenti-in-beni-strumentali>
- [139] «Rapporto sulle dimensioni del mercato degli umanoidi, previsioni (2025-2030) | Analisi della ricerca». Consultato: 30 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.mordorintelligence.it/industry-reports/humanoids-market>
- [140] «Top 12 humanoid robotics companies to watch in 2025 - Standard Bots». Consultato: 8 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://standardbots.com/blog/humanoid-robotics-companies>
- [141] N. Ghodsian, K. Benfriha, A. Olabi, V. Gopinath, e A. Arnou, «Mobile Manipulators in Industry 4.0: A Review of Developments for Industrial Applications», *Sensors*, vol. 23, fasc. 19, p. 8026, set. 2023, doi: 10.3390/s23198026.
- [142] I. I. F. of Robotics, «Collaborative Robots - How Robots Work alongside Humans», IFR International Federation of Robotics. Consultato: 8 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/how-robots-work-alongside-humans>
- [143] R. N. Shea e R. Automation, «Collaborative Robot Technical Specification ISO/TS 15066 Update».
- [144] «RoboMon». Consultato: 8 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.universal-robots.com/marketplace/products/01tP40000071NMoIAM/>
- [145] G. Bock, «New IFR Position Paper Explores the State of Humanoid Robotics», AI Insider. Consultato: 8 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://theaiinsider.tech/2025/08/16/new-ifr-position-paper-explores-the-state-of-humanoid-robotics/>
- [146] «Cobot price explained: 2025 guide to collaborative robot costs - Standard Bots». Consultato: 8 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://standardbots.com/blog/collaborative-robot-prices-the-ultimate-guide>
- [147] I. I. F. of Robotics, «Humanoid Robots: "Vision and Reality" Paper Published by IFR», IFR International Federation of Robotics. Consultato: 8 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/humanoid-robots-vision-and-reality-paper-published-by-ifr>
- [148] «A new study measures the actual impact of robots on jobs. It's significant. | MIT Sloan». Consultato: 9 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/a-new-study-measures-actual-impact-robots-jobs-its-significant>
- [149] D. Acemoglu e P. Restrepo, «Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets», *J. Polit. Econ.*
- [150] «ifr.org/img/office/IFR_The_Impact_of_Robots_on_Employment.pdf». Consultato: 9 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: https://ifr.org/img/office/IFR_The_Impact_of_Robots_on_Employment.pdf
- [151] Motor1 Italia, *Dentro la fabbrica delle FERRARI del futuro (anche elettriche)*, (19 luglio 2024). Consultato: 9 settembre 2025. [Online Video]. Disponibile su: <https://www.youtube.com/watch?v=-KEyglS8zfE>

- [152] «Corso annuale IFTS in Manutenzione dei sistemi meccatronici per l’Industria 4.0», ITS Lombardia Meccatronica. Consultato: 10 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://itslombardiameccatronica.it/corsi/corso-annuale-ifts-in-manutenzione-dei-sistemi-meccatronici-per-lindustria-4-0/>
- [153] «Corso Meccatronica e Industria 4.0», ITS Umbria. Consultato: 10 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.itsumbria.it/corso/meccatronica-e-industria-4-0/>
- [154] «IFR: five trends will drive robot growth through 2025 | The Supply Chain Xchange». Consultato: 10 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.thesupplychainxchange.com/tech-infrastructure/technology/ifr-five-trends-will-drive-robot-growth-through-2025>
- [155] P. Fankhauser, «Workforce Safety in the Metal Industry: The Role of Autonomous Inspection Robots in High-Risk Environments», ANYbotics. Consultato: 10 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.anybotics.com/news/inspection-robots-metal-industry-safety-efficiency/>
- [156] frenken, «Robotics beyond cost benefits - Elevating the human workforce», Smart Robotics. Consultato: 10 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://smart-robotics.io/robotics-beyond-cost-benefits/>
- [157] F. Stuhlemiller, S. Weyand, J. Jungblut, L. Schebek, D. Clever, e S. Rinderknecht, «Impact of Cycle Time and Payload of an Industrial Robot on Resource Efficiency», *Robotics*, vol. 10, fasc. 1, p. 33, mar. 2021, doi: 10.3390/robotics10010033.
- [158] H. Wyatt, A. Wu, R. Thomas, e Y. Yang, «Life Cycle Analysis of Double-Arm Type Robotic Tools for LCD Panel Handling», *Machines*, vol. 5, fasc. 1, p. 8, mar. 2017, doi: 10.3390/machines5010008.
- [159] «Are Robots Bad for The Environment? Full Analysis - PROVEN Robotics». Consultato: 10 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://provenrobotics.ai/are-robots-bad-for-the-environment/>
- [160] «Cobot plug&play con sistema di controllo integrato». Consultato: 10 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.igus.it/robolink/rebel-cobot>
- [161] «Robot Refurbishment Services | Global Robots». Consultato: 10 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://globalrobots.com/refurbishment/>
- [162] «Should you buy a new robot or invest in refurbishing a used one? | ABB», News. Consultato: 10 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://new.abb.com/news/detail/120075/wbstr-should-you-buy-a-new-robot-or-invest-in-refurbishing-a-used-one>
- [163] C. R. Network, «What is the Climate Impact of Humanoid Robots?», Climate Robotics Network. Consultato: 10 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://climaterobotics.network/f/what-is-the-climate-impact-of-humanoid-robots>
- [164] 0-ilaria, «ROBOTICS AS A SERVICE (RaaS)», Logistica Efficiente. Consultato: 10 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.logisticaefficiente.it/wiki-logistica/supply-chain/robotics-as-a-service-raas.html>
- [165] Solintec, «Canone Teleassistenza: quali benefici per l’Industria 4.0 e 5.0?», Solintec. Consultato: 11 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.solintec.it/canone-teleassistenza-industriale/>
- [166] «Agility Robotics - Get a Robot Fleet». Consultato: 11 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.agilityrobotics.com/get-started>
- [167] «Gxo Signs Industry-First Multi-Year Agreement with Agility Robotics». Consultato: 11 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.agilityrobotics.com/content/gxo-signs-industry-first-multi-year-agreement-with-agility-robotics>
- [168] PeroMicic, «Humanoid robots: how much will they cost? (Part 4)», FutureManagementGroup AG. Consultato: 11 settembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.futuremanagementgroup.com/en/humanoid-robots-how-much-will-they-cost-part-4/>
- [169] I. I. F. of Robotics, «New IFR position paper on humanoid robots published», IFR International Federation of Robotics. Consultato: 14 ottobre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/new-ifr-position-paper-on-humanoid-robots-published>
- [170] «Humanoid Robots: The Scaling Challenge - IEEE Spectrum». Consultato: 12 ottobre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://spectrum.ieee.org/humanoid-robot-scaling>
- [171] «Can automation help with talent challenges | McKinsey». Consultato: 14 ottobre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/automation-and-the-talent-challenge-in-american-manufacturing>
- [172] «Shining a Light on the Lack of Fully Automated “Dark Factories” | News & Insights», Gray. Consultato: 14 ottobre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.gray.com/insights/shining-a-light-on-the-lack-of-fully-automated-dark-factories/>
- [173] «Humanoid Robots in Manufacturing: The Next Frontier in Industrial Automation». Consultato: 14 ottobre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://ifactoryapp.com/blog/humanoid-robots-manufacturing-industrial-automation-future>
- [174] «The Future of Jobs Report 2023», World Economic Forum. Consultato: 14 ottobre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2023/in-full/executive-summary/>
- [175] P. M. S.- iFactory, «Humanoid Robots in Manufacturing: The Next Frontier in Industrial Automation». Consultato: 16 luglio 2025. [Online]. Disponibile su: <https://ifactoryapp.com/blog/humanoid-robots-manufacturing-industrial-automation-future>
- [176] «Revolutionizing Life: Humanoid And Wheeled Robots Shaping The Future Of Technology - Reeman news - News». Consultato: 14 ottobre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.reemanrobot.com/news/humanoid-and-wheeled-robot-67576556.html>
- [177] «Perché i robot umanoidi ci fanno impressione? Ecco cos’è la “Uncanny Valley”». Consultato: 14 ottobre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.geopop.it/perche-i-robot-umanoidi-ci-fanno-impressione-ecco-cose-la-uncanny-valley/>