UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

L'impatto di Industria 4.0 sulle performance aziendali: analisi dei benefici e delle opportunità emergenti

Relatore: Roberto Panizzolo

Correlatore: Marcos Dieste Gracia

Laureando: Vittorio Gulinazzo
Matricola: 2029243

Anno Accademico: 2023/2024

SOMMARIO

Questi ultimi anni sono stati caratterizzati dall'emergere di nuovi paradigmi produttivi spinti da avanzamenti tecnologici all'insegna dell'innovazione, i quali hanno segnato l'inizio della quarta rivoluzione industriale. Questo cambiamento epocale ha portato alla nascita del concetto di Industria 4.0. Sono molti i vari ambiti ed aspetti sui quali l'integrazione di queste tecnologie nei processi produttivi si prevede avrà un impatto significativo, a partire dalla dimensione tecnica/operativa, alla realtà economica, ambientale, e fino alla vita sociale di tutti i giorni, oltre al mondo del lavoro e alla sua organizzazione.

Questa tesi si focalizza proprio sugli impatti appena elencati dell'Industria 4.0, esplorando come l'introduzione di tecnologie avanzate stia trasformando le dinamiche aziendali in tutti questi campi, e proponendosi di analizzarne e rimarcarne gli enormi benefici. Il problema principale affrontato riguarda le sfide che le aziende devono affrontare per integrare nuove tecnologie digitali e per adattare le proprie strutture e processi interni alla digitalizzazione. Con l'Industria 4.0, le imprese devono affrontare un cambiamento radicale che va dalla gestione della supply chain fino alla personalizzazione del prodotto e alla sostenibilità. In parallelo, si affrontano anche le sfide legate alla gestione delle risorse umane e alla formazione del personale per adattarsi a questo nuovo paradigma tecnologico.

Per risolvere questo problema, la tesi adotta un approccio analitico dello stato dell'arte, esaminando un vasto corpus di articoli e scritti e proponendo per ogni tipologia di impatto una serie di policy atte a mitigare, se non a prevenire ed eventualmente provare a correggere, i vari aspetti negativi scaturenti dalla trasformazione digitale portata dall'Industria 4.0

I risultati principali indicano che, grazie all'implementazione delle tecnologie dell'Industria 4.0, le aziende possono ottenere una maggiore efficienza operativa, ridurre i costi e migliorare la sostenibilità dei propri processi. Inoltre, l'integrazione delle tecnologie digitali permette una maggiore flessibilità nella produzione, consentendo la personalizzazione di massa e una riduzione dei tempi di consegna. Questo nuovo modello operativo, tuttavia, richiede una gestione del cambiamento accurata e un investimento nella formazione continua dei lavoratori.

Questo lavoro è rilevante per aziende e professionisti interessati alla transizione verso modelli di produzione avanzati, in quanto fornisce una visione panoramica e generale delle implicazioni tecnologiche, economico-finanziarie, ambientali, sociali e organizzative dell'Industria 4.0, evidenziando sia le opportunità che le sfide.

INDICE

SOMMARIO

INTRODUZIONE 1

1 CAPITOLO 1: L'INDUSTRIA 4.0 5

1.1 Contesto storico 5

1.2 I principi fondamentali 7

1.3 Le tecnologie abilitanti 9

2 CAPITOLO 2: GLI IMPATTI OPERATIVI 26

2.1 Premesse 26

2.2 Le applicazioni delle tecnologie 4.0 27

2.2.1 Sistemi di controllo e supervisione 27

2.2.2 Sistemi di automazione del magazzino 29

2.2.3 Automazione dei processi industriali 31

..... 33

2.3 Benefici degli impatti operativi 33

2.3.1 Cambiamenti nell'automazione e nell'efficienza operativa 33

2.3.2 Personalizzazione e flessibilità della produzione 35

2.3.3 Analisi dei dati e decision making 37

2.3.4 Comunicazione e collaborazione 38

2.4 Sfide e considerazioni 40

2.4.1 Consumo energetico delle tecnologie 40

2.4.2 Sicurezza dei dati 41

2.4.3 Competenze del personale 42

3 CAPITOLO 3: GLI IMPATTI ECONOMICO-FINANZIARI 45

3.1 Premesse 45

3.2 Impatti Finanziari 46

3.2.1 Impatto sui bilanci aziendali 46

3.2.2 Riduzione dei costi di breve e lungo termine 48

3.2.3 Finanziamenti ed incentivi 50

3.3 Impatti economici 51

3.3.1 Aumento della produttività 51

3.3.2 Miglioramento della qualità dei prodotti 53

3.3.3 Creazione di nuove opportunità di mercato 55
3.3.4 Competitività e globalizzazione 57
3.4 Sfide e considerazioni 59
3.4.1 Costi di Implementazione 59
3.4.2 Rischi tecnologici-finanziari nell'Industria 4.0 62
3.4.3 Rischi organizzativi-finanziari nell'Industria 4.0 63
3.4.4 Strategie di gestione del cambiamento per l'adozione dell'Industria 4.0 65
3.5 Case Studies 66
4 CAPITOLO 4: GLI IMPATTI AMBIENTALI 71
4.1 Premesse 71
4.2 Le tematiche fondamentali 73
4.2.1 Riduzione delle emissioni di carbonio attraverso l'ottimizzazione energetica 73
4.2.2 Migliore gestione dei rifiuti 75
4.2.3 Efficienza migliore delle risorse attraverso il loro uso sostenibile 77
4.2.4 Miglioramento della logistica 79
4.2.5 Impatti ecologici positivi grazie ad una produzione più sostenibile 82
4.3 Sfide e considerazioni 84
4.3.1 Danni indiretti all'ambiente 85
4.3.2 Consumi e sprechi 86
4.3.3 Considerazioni 87
5 CAPITOLO 5: GLI IMPATTI SOCIALI 91
5.1 Premesse 91
5.2 Impatti sul mondo del lavoro 94
5.2.1 Automazione e disoccupazione tecnologica 94
5.2.2 Trasformazione delle competenze 94
5.2.3 Nuovi ruoli e precarizzazione del lavoro 95
5.3 Effetti psicologici e socioculturali 96
5.3.1 Stress e benessere psicologico 97
5.3.2 Cambiamenti nelle relazioni sociali 98
5.3.3 Impatti nel lavoro: tra gestione, ripercussioni psicofisiche e cambiamento 99
5.4 Sfide e considerazioni 100
5.4.1 Divario digitale 100
5.4.2 Impatto sui gruppi vulnerabili 101

5.5 Policy e interventi per il benessere psicologico e le relazioni sociali 103
5.5.1 Inclusione digitale 103
5.5.2 Governance e regolamentazione del lavoro digitale 104
5.5.3 Politiche per la riqualificazione e l'apprendimento permanente 106
5.5.4 Politiche di protezione sociale e lavorativa 106
5.5.5 Promozione dell'inclusione digitale 107
5.6 L'Industria 5.0 108
5.6.1 Le caratteristiche di I5.0 109
5.6.2 Conclusioni e criticità 111
6 CAPITOLO 6: GLI IMPATTI ORGANIZZATIVI E VISIONE DI INSIEME DEL CONTESTO 4.0 115
6.1 Premesse 115
6.2 Ottimizzazione della Supply Chain 116
6.2.1 Le caratteristiche della nuova Supply Chain 116
6.2.2 La gestione a livello macroscopico 117
6.3 La trasformazione di lavoro e lavoratore 119
6.3.1 Un cambiamento sempre più prorompente: tra flessibilità e responsabilità maggiori 120
6.3.2 Competenze del lavoratore 4.0 121
6.3.3 La risposta delle aziende: politiche di selezione e formazione del personale 123
6.4 Il Product Lifecycle nell'epoca 4.0 126
6.4.1 Sviluppo del prodotto: dalla personalizzazione alla prototipazione rapida 126
6.4.2 Produzione intelligente e manutenzione predittiva 126
6.4.3 Sostenibilità e gestione del fine vita del prodotto 127
6.4.4 Il modello del PLC sul mercato e il ruolo dell'Intelligenza Artificiale 128
6.5 Il panorama europeo e italiano 131
6.5.1 Una panoramica sulle caratteristiche delle policy europee 4.0 131
6.5.2 Il caso italiano: Il Piano Nazionale Industria 4.0 134
CONCLUSIONI 139
BIBLIOGRAFIA 143
SITOGRAFIA 151
RINGRAZIAMENTI 153

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, l'evoluzione tecnologica ha radicalmente trasformato i contesti economici, sociali e culturali, esercitando un impatto significativo soprattutto sul mondo del lavoro. La cosiddetta quarta rivoluzione industriale, nota come Industria 4.0, ha rappresentato una svolta epocale nel modo in cui le imprese concepiscono e gestiscono i propri processi produttivi. Questo nuovo paradigma, caratterizzato dalla fusione tra tecnologie digitali avanzate e i sistemi produttivi tradizionali, ha dato vita a un modello di produzione altamente automatizzato e intelligente. Le tecnologie altamente avanzate che essa porta e la robotica sono diventate elementi essenziali della cosiddetta "Smart Manufacturing", capace di rendere la produzione più flessibile, efficiente e adattabile alle mutevoli esigenze del mercato.

Il presente elaborato si propone di esplorare in modo approfondito le diverse tipologie di impatti della trasformazione digitale portata dall'Industria 4.0 sulle imprese e sull'organizzazione del lavoro, sia a livello nazionale che internazionale, e di rimarcarne le enormi potenzialità, nonché di illustrare come l'adozione delle sue tecnologie ed innovazioni possa principalmente portare grossi benefici alle imprese.

Da evidenziare subito è che la trasformazione digitale delle imprese non è solo un cambiamento tecnico, ma un vero e proprio mutamento culturale che coinvolge l'intero sistema aziendale. Essa si manifesta attraverso l'adozione di nuovi modelli di business, la revisione delle strutture organizzative, produttive e gestionali, nonché delle responsabilità dei soggetti coinvolti, come avremo modo di approfondire in questo elaborato.

Tra i principali vantaggi riconosciuti dalla letteratura e dalle analisi di settore vi sono l'automazione dei processi produttivi, che riduce i tempi di produzione e gli errori umani, e l' utilizzo di sistemi interconnessi che permettono una gestione in tempo reale delle risorse e delle operazioni aziendali, inoltre vedremo come tali aspetti contribuiscano a migliorare la competitività delle imprese, soprattutto quelle che operano in settori ad alta intensità tecnologica o in contesti di produzione altamente personalizzata.

Questo nuovo modello industriale inoltre ha il potenziale per creare nuovi settori economici e rivoluzionare industrie tradizionali come quella dei trasporti, con l'introduzione di veicoli autonomi e droni, o quella sanitaria, dove le tecnologie IA consentono lo sviluppo di farmaci personalizzati e l'uso di robot per migliorare l'assistenza ai pazienti. Oltre a questo è presente la produzione additiva, conosciuta anche come stampa 3D, nonché una delle più importanti tecnologie dell'Industria 4.0, che come discuteremo è in grado di offrire una nuova flessibilità, consentendo alle aziende di rispondere in modo più rapido alle esigenze personalizzate dei clienti e di sviluppare nuovi prodotti con tempi di consegna ridotti.

L'impatto della digitalizzazione sulle competenze lavorative è altrettanto profondo, richiedendo alle imprese di ripensare le proprie strategie di reclutamento e formazione del personale, con particolare attenzione alle cosiddette "digital skills", competenze cruciali per poter operare in un contesto sempre più digitalizzato. Avremo modo di vedere poi che uno dei principali vantaggi dell'Industria 4.0 è la possibilità di migliorare la produttività aziendale, riducendo sprechi e inefficienze grazie a un uso intelligente dei dati e delle risorse.

La raccolta e l'analisi di grandi quantità di dati in tempo reale, resa possibile dalle tecnologie 4.0, consente alle imprese di prendere decisioni più informate e tempestive, migliorando così la qualità e l'efficacia dei processi produttivi. Inoltre, l'integrazione tra macchine intelligenti e dispositivi connessi permette di ottimizzare l'intera catena di approvvigionamento, rendendo il flusso di informazioni più fluido e continuo, migliorando la capacità di risposta alle variazioni della domanda di mercato.

Nell'era dell'Industria 4.0, l'abilità delle aziende di adattarsi e innovare sarà determinante per il loro successo e per il futuro del mercato del lavoro globale.

Tuttavia, nonostante le enormi potenzialità offerte dalle tecnologie di Industria 4.0, ci sono sfide significative da affrontare. Esistono diversi studi che mettono in luce anche le problematiche e le sfide legate all' implementazione dell'Industria 4.0. Un obiettivo altrettanto importante di questo lavoro consiste, quindi, nell'identificare e discutere di queste difficoltà.

L'adozione di queste tecnologie richiede ingenti investimenti in infrastrutture, tecnologia e risorse umane. Le imprese devono ripensare profondamente i loro processi organizzativi e produttivi, investendo nella formazione del personale per colmare il divario di competenze digitali che, altrimenti, rischia di frenare la piena adozione di questi nuovi modelli produttivi. A questo si aggiungono le preoccupazioni legate agli effetti sociali ed economici della digitalizzazione e dell'automazione. L'automazione di molte mansioni potrebbe comportare una riduzione dei posti di lavoro tradizionali, creando una sfida per i governi e le imprese, chiamati a sviluppare politiche efficaci per sostenere l'occupazione e la riqualificazione della forza lavoro.

L'impatto della digitalizzazione sulle competenze lavorative è profondo, richiedendo alle imprese di ripensare le proprie strategie di reclutamento e formazione del personale, con particolare attenzione alle cosiddette "digital skills", competenze cruciali per poter operare in un contesto sempre più digitalizzato. Il rischio qui si chiama disoccupazione tecnologica, ovvero la perdita di posti di lavoro a causa dell'automazione e della digitalizzazione di interi settori.

Inoltre, l'integrazione tecnologica introduce nuove vulnerabilità legate alla sicurezza informatica e alla protezione dei dati aziendali, che possono compromettere la stabilità operativa e la fiducia del mercato.

Tra esse rientrano le problematiche relative ai costi iniziali elevati per l'adozione di nuove tecnologie, la necessità di investimenti in formazione del personale.

L'Industria 4.0 quindi, caratterizzata dall'integrazione di tecnologie avanzate e all'avanguardia, rappresenta un cambiamento radicale nel modo in cui le aziende operano, innovano e competono nel mercato globale. Tuttavia, anche se le potenzialità di questa trasformazione sono state ampiamente celebrate, è importante notare che il passaggio al digitale non è privo di criticità.

La metodologia utilizzata per raggiungere gli obiettivi della tesi si basa su un approccio di tipo qualitativo e comparativo, focalizzato sull'analisi critica e discorsiva di un ampio corpus di letteratura scientifica e studi di settore.

Questa revisione includerà articoli accademici, report di istituti di ricerca come il McKinsey Global Institute o l'OCSE, e studi pubblicati da enti governativi e organizzazioni internazionali, nonché su journal importanti come l*'International Journal of Production Research*, l*'International Journal of Industrial Organization*, l'*International Journal of Production Economics* e simili. L'analisi della letteratura sarà organizzata in modo da individuare sia i contributi che evidenziano gli impatti positivi dell'Industria 4.0, sia quelli che mettono in luce i problemi o le sfide legate alla sua adozione. L'obiettivo generale è fornire una panoramica ampia e articolata che tenga conto dei molteplici punti di vista relativi agli impatti dell'Industria 4.0 sulle imprese. Nella sezione metodologica si adotteranno i seguenti approcci che verranno incorporati in ogni capitolo:

- *Introduzione all'argomento:* come primo passo verrà presentata una breve premessa che illustrerà sommariamente l'argomento che verrà trattato di seguito, evidenziandone l'importanza e le caratteristiche salienti.

- *Confronto tra impatti positivi e negativi*: un'altra parte della metodologia consisterà nell'illustrare prima tutti quelli che sono i benefici che l'Industria 4.0 può portare alle imprese, e poi tutti i possibili svantaggi e le criticità della stessa, rimarcando soprattutto le sue varie mancanze ad oggi ancora non colmate. Questo confronto critico consentirà di identificare punti di convergenza e divergenza tra le fonti esaminate e di comprendere meglio come i vari settori stiano affrontando la transizione verso questa nuova era industriale. La discussione sarà arricchita da grafici e tabelle che visualizzano e schematizzano lo stato dell'arte.

- *Studio di casi aziendali*: per rendere l'analisi più concreta e applicata, verranno esaminati alcuni casi studio di imprese che hanno implementato in modi differenti tecnologie legate all'Industria 4.0. L'obiettivo è valutare in che modo le diverse aziende si sono approcciate all'innovazione tecnologica, e comprendere meglio come l'adozione delle tecnologie 4.0 possa portare soprattutto enormi benefici alle diverse realtà aziendali e non (tecnologico, economico, ambientale e sociale).

- *Riassunto tabulato*: alla fine di ogni capitolo sarà presente una tabella che riassumerà e metterà a confronto gli aspetti positivi e negativi di maggior rilievo dell'impatto in questione

Nel primo capitolo verranno presentati un background storico e uno teorico che illustreranno rispettivamente l'evoluzione dell'industria fino a giungere alle origini di quella che è l'Industria 4.0, e poi l'insieme delle caratteristiche fondamentali ed i principi cardine. Verranno descritte, inoltre, le varie tecnologie abilitanti che la compongono e si discuterà di come queste tecnologie possano rivoluzionare il sistema produttivo tradizionale, favorendo una maggiore interconnessione e automazione dei processi.

Nel secondo capitolo saranno trattati gli impatti operativi che queste tecnologie abilitanti comportano all'interno della realtà aziendale, a partire appunto dal grado di automazione all'efficienza operativa, per poi passare al cambiamento della flessibilità all'interno dei processi e della capacità di customizzare i prodotti, parlando anche di come in questo contesto si dovranno leggere i dati e prendere di conseguenza decisioni più informate, ed infine delineando le nuove tipologie di collaborazione e comunicazione tra macchine, enti e persone.

Questo ovviamente non dimenticando la questione relativa ai consumi energetici maggiori che l'utilizzo delle tecnologie 4.0 comporta, nonché quella inerente alla cybersecurity e al forte mutamento delle competenze richieste al personale.

Il terzo capitolo sarà incentrato sugli impatti che influenzeranno le performance finanziarie delle imprese; in particolar modo si analizzeranno i costi e i benefici economici associati all'adozione delle varie tecnologie abilitanti, come l'Intelligenza Artificiale, l'Internet delle Cose e l'automazione avanzata. L'obiettivo è comprendere in che modo tali innovazioni possano influire sulla redditività aziendale, sull'efficienza operativa e sui modelli di investimento, nonché i rischi finanziari legati a questa trasformazione. Sarà fondamentale valutare come l'Industria 4.0 possa rappresentare un'opportunità per aumentare la competitività e generare valore a lungo termine, ma anche quali sfide finanziarie comporti per le imprese, soprattutto in termini di investimenti iniziali e gestione dei costi di implementazione.

Per quanto riguarda il quarto capitolo, esso sarà dedicato all'analisi degli impatti sociali dell'Industria 4.0. Verranno esplorate le implicazioni che la trasformazione digitale ha sulla forza lavoro, sulla distribuzione delle competenze e sulle dinamiche occupazionali, nonché le possibili ripercussioni a livello psicologico che possono manifestarsi in un tale contesto. La digitalizzazione e l'automazione possono infatti portare ad uno sconvolgimento del mercato del lavoro, con potenziali rischi di disoccupazione tecnologica per varie categorie di personale, ma anche opportunità legate alla creazione di nuovi ruoli e alla necessità di nuove competenze. Si cercherà di comprendere in che misura l'Industria 4.0 stia ridefinendo il concetto di lavoro, il rapporto tra uomo e tecnologia e, più in generale, l'impatto sulle relazioni sociali.

Infine, il quinto e ultimo capitolo si concentrerà sugli effetti della digitalizzazione in ambito aziendale, analizzando le conseguenze per la struttura organizzativa, la supply chain, i modelli produttivi per il ruolo e le competenze dei lavoratori, dove il tutto culminerà in una visione più ampia e comprensiva che vede lo studio del ciclo totale di vita del prodotto. La digitalizzazione comporta infatti una trasformazione non solo delle tecnologie utilizzate, ma anche del modo in cui le imprese gestiscono la propria attività, portando a una riorganizzazione del lavoro e dei ruoli all'interno dell'azienda. Verranno esaminate inoltre le politiche adottate dai paesi dell'Unione Europea, per promuovere la diffusione delle competenze digitali e facilitare la transizione verso l'Industria 4.0.

1 CAPITOLO 1: L'INDUSTRIA 4.0

1.1 Contesto storico

Partiamo innanzitutto col dire che la storia delle rivoluzioni industriali non dovrebbe essere considerata come una serie di eventi isolati, ma piuttosto come una sequenza continua di innovazioni che si sviluppano grazie ai progressi delle precedenti, portando a livelli sempre più avanzati di produzione.

Al principio, la prima rivoluzione industriale iniziò in Inghilterra tra il 1750 e il 1760, e si protrasse fino al 1830, e costituì un evento tale da rappresentare uno dei momenti di svolta più significativi nella storia dell'umanità. In quel periodo, le nuove invenzioni meccaniche iniziarono a rimpiazzare il lavoro manuale umano e animale. Come descritto da Xu et al. (2018)[1], questa transizione fu segnata dall'utilizzo del carbone come principale fonte energetica, sostenuta dall'intensa attività estrattiva, e dall'invenzione della macchina a vapore. Quest'ultima rappresentò il fattore chiave per lo sviluppo di un nuovo tipo di energia, che a sua volta accelerò la costruzione delle ferrovie. Grazie alla macchina a vapore, si passò dalla società agraria e feudale a un modello produttivo industriale, caratteristico della prima rivoluzione. Dal punto di vista occupazionale, l'industria tessile e la produzione dell'acciaio divennero settori di primaria importanza, rappresentando la colonna portante in termini di forza lavoro, capitale investito e valore della produzione.

La seconda rivoluzione industriale si colloca tra il 1870 e il 1914, sebbene alcuni eventi importanti, come l'invenzione del processo Bessemer nel 1856, anticiparono il suo inizio già negli anni '50 dell'Ottocento. In questo periodo si consolidò una forte sinergia tra ferro, acciaio, carbone e ferrovie, mentre i progressi nella tecnologia produttiva permisero la diffusione di reti tecnologiche già esistenti, come quelle telegrafiche e ferroviarie, l'erogazione di gas, acqua e la creazione di sistemi fognari, che inizialmente erano presenti solo in poche città. L'espansione delle reti ferroviarie e telegrafiche dopo il 1870 consentì lo spostamento senza precedenti di persone e idee, aprendo la strada a una nuova ondata di globalizzazione. Furono introdotti nuovi sistemi, tra cui l'elettricità e il telefono, che rivoluzionarono il modo di vivere e lavorare, con anche le ferrovie che facilitarono il trasporto economico di merci, creando a loro volta nuove opportunità per l'infrastruttura stradale. Uno dei progressi tecnologici più rilevanti fu in particolare l'invenzione del motore a combustione interna, che inaugurò un'epoca di rapida industrializzazione basata sull'utilizzo di petrolio ed elettricità per alimentare la produzione di massa. Grazie ai miglioramenti nell'efficienza delle macchine a vapore, come i motori a tripla espansione, le navi potevano trasportare più carico, incrementando il volume del commercio internazionale.

La terza rivoluzione industriale invece, iniziata nel 1947 con l'invenzione del transistor, vide l'introduzione dell'elettronica e della tecnologia informatica come strumenti per automatizzare la produzione. Questo periodo è caratterizzato dai progressi in campo elettronico e nelle telecomunicazioni, conosciuti come tecnologie dell'informazione, che si diffusero in tutti i settori industriali. Già dal secondo dopoguerra, la chimica e l'uso di derivati del petrolio superarono l'impiego del carbone, portando alla creazione di materiali sempre più innovativi.

[1] Xu M., David J. M., Kim S. H., 2018, The fourth industrial revolution: Opportunities and challenges*, International journal of financial research*, vol. *9, n. 2, pp. 90–95.*

Inoltre, in questo periodo venne costruito il primo computer per scopi militari, in particolare per il calcolo delle traiettorie balistiche. Questa nuova tecnologia venne poi adottata anche nel settore produttivo civile, con lo sviluppo della programmazione delle macchine e la miniaturizzazione dei componenti, culminata con l'invenzione del microchip. Il lancio di Internet nel 1969 segnò poi un altro momento chiave, permettendo la creazione di una rete globale di scambio di informazioni. La terza rivoluzione industriale contribuì anche alla fine del modello fordista di organizzazione del lavoro e all'ascesa dell'economia verde, con una crescente attenzione alle energie rinnovabili e ai trasporti automatici, che ridussero l'impatto ambientale.

Infine, con la quarta rivoluzione industriale, siamo entrati nell'era dell'Industria 4.0, caratterizzata da una velocità di cambiamento, complessità e capacità trasformativa senza precedenti rispetto alle epoche passate, come schematizzato in figura 1.1. Il termine "Industria 4.0" fu coniato in Germania nel 2011, durante la Fiera di Hannover, con la presentazione del progetto "Zukunftsprojekt Industrie 4.0"[2], volto a modernizzare il sistema produttivo tedesco, posizionando la Germania tra le potenze manifatturiere globali. A differenza della terza rivoluzione industriale, incentrata sulla digitalizzazione delle macchine, l'Industria 4.0 cerca di digitalizzare ogni aspetto della vita quotidiana, fondendo il mondo fisico con quello virtuale. Questa evoluzione ha portato alla creazione di ambienti intelligenti, dove le informazioni sono condivise in modo più efficiente, riducendo tempi e costi. La trasformazione riguarda non solo la produzione, ma anche la strategia e l'organizzazione aziendale, consentendo alle imprese di essere più efficaci e reattive rispetto alle mutevoli condizioni di mercato.

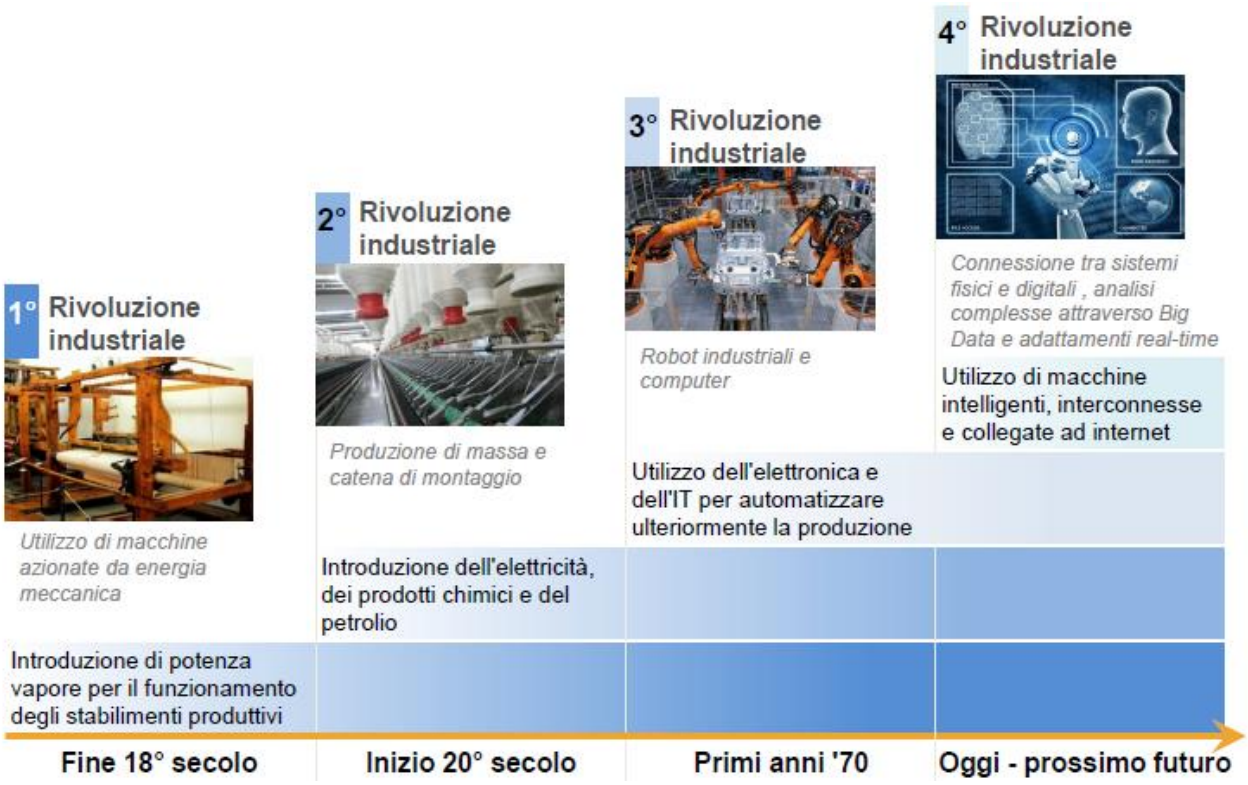

Fig. 1.1*: Le quattro rivoluzioni industriali.*
Fonte: Ministero dello Sviluppo Economico, 2017.

[2] https://www.wired.it/economia/lavoro/2018/02/23/industria-40/?refresh_ce=.

Così, si aprono nuove opportunità per modelli di business innovativi, spingendo le aziende ad adattarsi alle nuove sfide del mercato globale, in accordo con Hermann et al. (2016)[3]. Nello specifico, il cuore di questa rivoluzione è rappresentato dalla "produzione intelligente", dove la digitalizzazione sta rivoluzionando il settore manifatturiero. Le imprese cercano di implementare sistemi flessibili che consentano di ridurre i tempi di produzione e i costi, migliorando al contempo la qualità dei prodotti. Secondo Trappey et al. (2017)[4], l'Industria 4.0 è il risultato dell'integrazione di diverse tecnologie avanzate come l'Internet of Things (IoT), i Cyber Physical Systems (CPS), il Cloud Computing e l'analisi dei Big Data, finalizzate a ottimizzare l'intero processo produttivo e gestionale, e che avremo modo di esplorare nel dettaglio fra poco. Questo paradigma tecnologico sta modificando non solo il settore industriale, ma anche il modo in cui i consumatori percepiscono i prodotti, con un passaggio dalla produzione di massa a una personalizzazione di massa. Le macchine, interconnesse in tempo reale, sono in grado di adattarsi alle richieste del mercato e personalizzare i prodotti. L'impatto si estende a ogni livello aziendale, con miglioramenti significativi non solo nei processi ripetitivi, ma anche nelle strategie di marketing e logistica, grazie alla riduzione dei tempi di consegna. Le automobili, ad esempio, possono essere aggiornate a livello software ovunque nel mondo, simultaneamente. Questa rivoluzione, guidata dunque dal web, si è sviluppata in particolare in risposta alla crisi economica del 2007-2009 e all'esigenza di adattarsi alla globalizzazione. L'Industria 4.0 rompe con i paradigmi tradizionali delle rivoluzioni precedenti, essendo irreversibile, applicabile a ogni settore e imprevedibile, poiché i suoi effetti completi si vedranno solo col tempo. Il web, oltre a essere uno strumento di comunicazione, offre oggi ai consumatori la possibilità di valutare beni e servizi su scala globale, superando l'asimmetria informativa che in passato caratterizzava i mercati (Bernard Marr, 2018)[5].

1.2 I principi fondamentali

La rivoluzione digitale si fonda su alcune linee guida centrali che definiscono l'operatività e la struttura delle imprese nell'ambito dell'Industria 4.0. Questi principi rappresentano elementi chiave che, se integrati correttamente nei processi aziendali, possono portare a significativi vantaggi competitivi rispetto alle organizzazioni più tradizionali. Secondo Schwab K. (2017)[6], ecco le caratteristiche principali:

- *Interconnessione*: gli elementi della catena produttiva (persone, macchinari, flussi operativi) devono essere in grado di comunicare tra loro e con l'esterno attraverso reti di dati. Questa interazione continua e fluida permette di superare le barriere della frammentazione e agevola

[3] Hermann M., Pentek T. and Otto B., 2016, Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review, *Hawaii international conference on system sciences (HICSS),* pp. 3928-3937.

[4] Trappey A. J., Trappey C. V., Govindarajan U. H., Chuang A. C. & Sun J. J., 2017, A review of essential standards and patent landscapes for the Internet of Things: A key enabler for Industry 4.0, *Advanced Engineering Informatics,* vol. 33, pp. 208–229.

[5] Bernard M., 2018, The Fourth Industrial Revolution: How the 4th Industrial Revolution Is Changing the Way We Work and Live*, Forbes*.

[6] Schwab K., 2016, *The Fourth Industrial Revolution.* Crow Publishing.

la condivisione immediata delle informazioni in tutte le aree coinvolte, ottimizzando la produttività e la risoluzione dei problemi.

- *Digitalizzazione*: grazie ai sensori installati sui componenti fisici, l'azienda può essere replicata virtualmente attraverso un modello digitale, noto come "gemello digitale" (digital twin). Questo sistema, unendo il mondo fisico con quello virtuale, consente di simulare scenari reali e testare cambiamenti senza intervenire direttamente sui beni fisici. In questo modo, si possono sperimentare modifiche per adattarsi ai cambiamenti del mercato in modo agile e rapido.
- *Autonomia decisionale*: i sistemi intelligenti, dotati di tecnologie avanzate, sono in grado di prendere decisioni senza l'intervento umano. Attraverso l'intelligenza artificiale, macchinari come i robot possono identificare errori e malfunzionamenti e correggere il loro operato autonomamente, garantendo maggiore efficienza nei processi.
- *Interazione a distanza*: è possibile monitorare e intervenire sui sistemi aziendali anche da remoto, permettendo un controllo continuo e tempestivo delle operazioni.
- *Risposta immediata*: la capacità di raccogliere dati in tempo reale e di reagire rapidamente è cruciale per migliorare la produttività e risolvere eventuali problemi. Un approccio che unisce produzione e manutenzione, favorendo l'autonomia degli operatori e prevenendo malfunzionamenti o interruzioni.
- *Flessibilità produttiva*: grazie all'integrazione tra il sistema informativo e la filiera produttiva, le aziende possono adattarsi rapidamente alle esigenze di mercato, modificando i processi in tempo reale per rispondere alla domanda.
- *Servizi integrati*: la tecnologia non solo permette di migliorare i processi produttivi, ma fornisce anche servizi utili per l'impresa. L'Internet dei servizi offre strumenti come la gestione del magazzino o il monitoraggio dei trasporti, che migliorano l'efficienza generale.
- *Sostenibilità*: l'ottimizzazione delle risorse energetiche, volta a ridurre l'impatto ambientale, è centrale. Migliorare l'efficienza energetica non solo riduce i costi, ma rende anche l'azienda più responsabile verso la società.
- *Collaborazione tra sistemi*: imprese diverse devono essere in grado di scambiarsi dati in maniera semplice e veloce. Questo consente la creazione di reti di aziende che, grazie alla condivisione di informazioni, possono operare a livello internazionale e aumentare la propria competitività.

Dunque, come continua Bernard M. (2018), l'Industria 4.0 con le sue tecnologie e caratteristiche rappresenta un cambiamento epocale, in cui l'innovazione tecnologica si fonde con un'evoluzione strategica e culturale dell'impresa. Il successo della trasformazione digitale non dipende solo dall'adozione di nuove tecnologie, ma richiede una visione aziendale rinnovata che coinvolge tutte le funzioni interne, dalla riqualificazione del personale alla capacità di adattarsi rapidamente ai cambiamenti del mercato. La sfida non è solo tecnologica, ma anche organizzativa e strategica: è essenziale che i leader aziendali comprendano l'importanza di una visione a lungo termine, capace di anticipare i bisogni del mercato e sfruttare al massimo le potenzialità offerte dalla digitalizzazione.

I manager della trasformazione digitale hanno il compito di cambiare il mindset dell'organizzazione, favorendo un ambiente dinamico e flessibile, pur mantenendo salda la mission aziendale.

1.3 Le tecnologie abilitanti

La fusione tra tecnologie digitali, internet e il mondo fisico ha dato vita a realtà intelligenti e interconnesse, rendendo possibile la quarta rivoluzione industriale. Questa trasformazione radicale interessa ogni aspetto dell'industria, creando un ecosistema produttivo altamente efficiente e dinamico. Le tecnologie emergenti sviluppate negli ultimi dieci anni sono fondamentali per la realizzazione di un mondo digitale in cui ogni elemento, vivente o inanimato, è connesso. I pilastri dell'Industria 4.0 sono proprio questi trend tecnologici, ed essi offrono un quadro chiaro del loro significato e valore. La continua ricerca e sviluppo in questo settore ha portato la catena di produzione a livelli di operatività senza precedenti, migliorando l'efficienza e la dinamica delle operazioni. Le tecnologie abilitanti non solo favoriscono l'innovazione dei processi, ma migliorano anche la qualità dei prodotti finali e dei servizi offerti. Secondo la Commissione Europea, queste tecnologie si caratterizzano per un'elevata intensità di conoscenza, oltre che per rapidi cicli di innovazione, significativi investimenti in R&D e la creazione di posti di lavoro altamente qualificati[7]. Esse rivestono un ruolo cruciale nel sistema produttivo, elevando la qualità della filiera produttiva e stimolando l'innovazione. Nonostante la digitalizzazione dell'industria sia una tendenza consolidata, la sua applicazione è ancora limitata e frammentaria. È essenziale non vedere la digitalizzazione solo in termini di produttività ed efficienza, ma considerare anche i numerosi vantaggi che essa comporta. L'integrazione e l'interconnessione delle tecnologie all'interno delle aziende consentono di ottimizzare il consumo delle risorse, abilitare nuovi modelli di business, migliorare la gestione del ciclo di vita dei prodotti, ridurre il time-to-market, permettere la personalizzazione di massa e comprendere in tempo reale le esigenze dei consumatori. Una moltitudine si imprese si appoggia al digitale per aumentare l'efficienza e ridurre i costi, ma i veri vantaggi competitivi saranno riservati a quelle aziende che sapranno integrare prodotti e servizi in modo innovativo.

Le aziende che non adottano le tecnologie abilitanti rimangono legate a un sistema limitato, che può portare a prodotti poco innovativi e meno adattabili alle richieste dei clienti. Questo limita la produzione e riduce la capacità di sfruttare nuovi canali di gestione degli ordini, come gli ordini on-demand. La mancanza di comunicazione con i clienti e l'assenza di raccolta dati impediscono la personalizzazione dei prodotti, un fattore sempre più cruciale per rispondere alle esigenze individuali dei consumatori. Il ruolo delle persone all'interno del sistema digitale è dunque assolutamente fondamentale per le aziende che desiderano innovare, così come avere la capacità di raccogliere feedback e utilizzare i dati per migliorare i prodotti è essenziale per rimanere competitivi. L'Industria 4.0 non solo trasforma i processi produttivi, ma ridefinisce anche l'intero ecosistema industriale. Le varie tecnologie abilitanti che porta con sé, come l'intelligenza artificiale, la robotica avanzata, l'Internet of Things (IoT), la stampa 3D e l'analisi dei Big Data, stanno creando nuove opportunità di business e cambiando radicalmente le dinamiche del mercato.

[7] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/it/MEMO_12_484;

In particolare, come descrive Wagner et al. (2017)[8] le tecnologie dell'Industria 4.0 possono essere primariamente classificate in tre principali categorie:

- *Acquisizione ed elaborazione dei dati*: questa classe include sensori (nello specifico IoT), attuatori, Cloud Computing e Big Data Analytics, Cybersecurity, supportate dall'IA.

- *Comunicazione M2M*: si tratta di sistemi che permettono alle macchine di comunicare e coordinare autonomamente le attività produttive fra di esse (robotica, cobots, additive manufacturing, IA).

- *Interazione uomo-macchina (HMI*): consiste nell'utilizzo di realtà virtuale e aumentata per migliorare l'interazione tra operatori e macchinari. Queste innovazioni permettono una maggiore flessibilità e semplificano l'interazione tra l'operatore e il macchinario, consentendo alla fine la realizzazione di produzioni complesse o molto customizzati (one-size-lot) che abilitano l'azienda a offrire sul mercato prodotti su misura.

Inoltre, va detto che nell'Industria 4.0 è basata in buona parte sull'utilizzo dei sistemi cyber-fisici (CPS), che rappresentano una tecnologia davvero fondamentale perché hanno il potenziale di poter attuare la personalizzazione di massa grazie alla modularità e alla variabilità nei sistemi di produzione. I CPS possono infatti connettere entità fisiche, abilitare l'interazione uomo-macchina, infrastrutture, processi e altre attività nel sistema quando collegati con l'Internet delle Cose. Ne consegue che l'interazione tra IoT e CPS consente la comunicazione tra le entità fisiche e il mondo virtuale tramite lo scambio di dati raccolti attraverso sensori e generati dalle attività manifatturiere (Jamwal et. al, 2021). Al contempo, altre tecnologie dell'Industria 4.0 agiscono come facilitatori per le pratiche aziendali abilitate dall'Industria 4.0, che fra poco vedremo nel dettaglio. La trasformazione digitale impone alle aziende di adottare un approccio proattivo verso l'innovazione, e ciò comporta talvolta numerose difficoltà legate agli adattamenti che un'impresa deve affrontare, poiché la capacità di adattarsi rapidamente ai cambiamenti tecnologici e di sfruttare le nuove opportunità offerte dalle tecnologie digitali è essenziale per il successo a lungo termine.

Come altra conseguenza le aziende devono investire in formazione e sviluppo delle competenze per preparare la forza lavoro a operare in un ambiente sempre più digitalizzato, dal momento che la collaborazione tra industria, ricerca e istituzioni educative è fondamentale per creare un ecosistema di innovazione sostenibile e competitivo. La creazione di questo nuovo ecosistema permette l'integrazione appunto di diverse tecnologie, e tra queste sono comunemente individuati dieci principali trend che stanno trasformando il modo di operare delle imprese, nonché le relazioni tradizionali all'interno delle stesse. Di seguito esaminiamo tali tecnologie (elencate in figura 1.2) nel dettaglio e analizzeremo gli impatti che derivano dalla loro adozione e utilizzo.

[8] Wagner T., Herrmann C., Thiede S., 2017, Industry 4.0 impacts on lean production systems, *Procedia*, vol. 63, pp. 125–131.

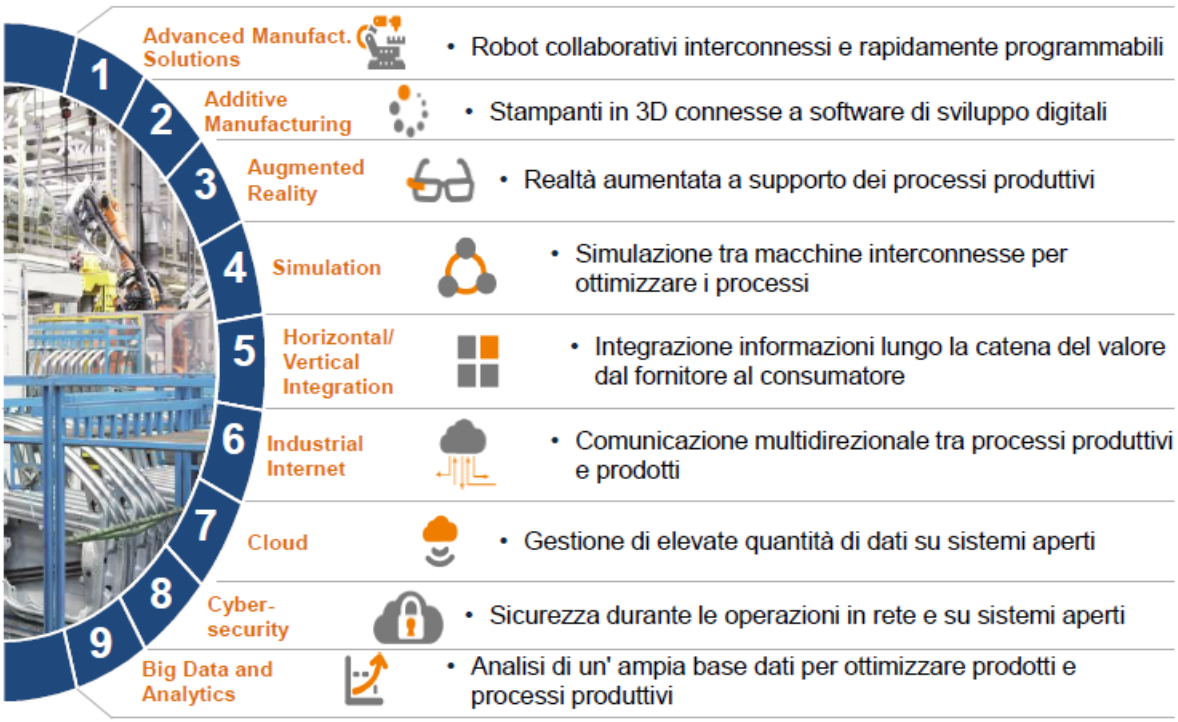

Fig. 1.2*: Le tecnologie protagoniste della trasformazione digitale della produzione industriale. Fonte: Redazione Make Group, 2020.*

- Internet of Things: l'IoT rappresenta una delle tecnologie chiave nell'Industria 4.0, trasformando radicalmente il modo in cui le imprese gestiscono le operazioni produttive. Questa tecnologia consente alle macchine di comunicare tra loro e con i sistemi centrali, creando una rete di dispositivi connessi che raccolgono e analizzano dati in tempo reale (Wagner et al., 2017). L'integrazione dell'IoT nei processi aziendali non solo migliora l'efficienza operativa, ma apre anche nuove possibilità per la manutenzione predittiva, riducendo significativamente i tempi di inattività e i costi di riparazione. Questo perché, per spiegarlo più nel dettaglio, l'IoT permette alle macchine e agli impianti di produzione di diventare "intelligenti": sensori avanzati installati su macchinari e attrezzature raccolgono dati continui su vari parametri operativi, come temperatura, vibrazione, pressione e umidità. Questi dati vengono trasmessi in tempo reale a sistemi centrali di gestione, dove vengono analizzati attraverso algoritmi di intelligenza artificiale e machine learning. Questa analisi in tempo reale consente alle aziende di monitorare costantemente le condizioni operative dei loro impianti, identificando immediatamente eventuali anomalie o segnali di degrado, mentre la comunicazione continua tra le macchine crea un ambiente di produzione altamente coordinato e reattivo: infatti, le informazioni fluiscono liberamente tra i diversi componenti del sistema produttivo, permettendo una gestione ottimizzata delle risorse e dei processi (Martinelli et al., 2021)[9].

[9] Martinelli A., Mina A., and Moggi M., 2021, The enabling technologies of industry 4.0: examining the seeds of the fourth industrial revolution, *Industrial and Corporate Change*, vol. 30, n. 1, pp. 161–188.

Ad esempio, se un sensore rileva un problema imminente in un macchinario, il sistema può automaticamente ridurre la velocità di produzione o reindirizzare il lavoro ad altre macchine, evitando guasti e minimizzando i tempi di fermo. Questo livello di automazione e reattività è essenziale per mantenere elevati standard di produttività e qualità in un contesto industriale sempre più competitivo. Inoltre, uno degli aspetti più rivoluzionari dell'IoT è la capacità di abilitare la manutenzione predittiva. Tradizionalmente, la manutenzione dei macchinari avveniva secondo programmi predefiniti o in risposta a guasti. Questo approccio reattivo può essere dunque inefficiente e costoso, comportando tempi di inattività non pianificati e interventi di riparazione urgenti. Con l'IoT, invece, la manutenzione predittiva diventa una realtà possibile e praticabile, poiché analizzando i dati raccolti dai sensori, i sistemi possono prevedere quando un componente è prossimo al guasto e programmare interventi di manutenzione in modo proattivo. Questo non solo riduce i tempi di inattività imprevisti, ma estende anche la vita utile delle attrezzature e ottimizza l'uso delle risorse di manutenzione.

Altro fattore da aggiungere, è l'impatto dell'IoT sulla riduzione dei costi operativi, il quale è più che significativo, visto che grazie a questa tecnologia si acquisisce la capacità di monitorare e ottimizzare continuamente le operazion, il che porta a una maggiore efficienza energetica, riduzione degli sprechi e miglioramento della produttività complessiva. Inoltre, la manutenzione predittiva riduce i costi associati ai guasti improvvisi e alle riparazioni urgenti, consentendo alle aziende di operare in modo più sostenibile e redditizio.

L'IoT dunque non solo migliora le operazioni interne delle aziende, ma può anche agevolare la gestione della catena di fornitura, dato che vi è la facoltà di disporre dispositivi connessi lungo la catena di approvvigionamento, i quali possono fornire visibilità in tempo reale su inventari, spedizioni e condizioni dei materiali. Questo livello di trasparenza e coordinazione migliora la capacità delle aziende di rispondere rapidamente alle variazioni della domanda, ottimizzare i livelli di inventario e ridurre i tempi di consegna (Büchi et al., 2020)[10]. Oltre a questo, l'adozione dell'IoT supporta l'implementazione di strategie di produzione just-in-time, riducendo gli sprechi e migliorando l'efficienza complessiva. La possibilità di monitorare continuamente le condizioni operative e le prestazioni dei macchinari permette di mantenere livelli ottimali di produzione, riducendo i tempi di fermo e migliorando la qualità dei prodotti finali. Questo approccio proattivo e basato sui dati alla gestione delle operazioni offre infatti indubbiamente un vantaggio competitivo significativo in un mercato globale che è sempre più esigente e in rapida evoluzione. I principali servizi e benefici portati dall'IoT sono schematizzati in figura 1.3.

[10] Buchi G., Cugno M. and Castagnoli R., 2020, Smart factory performance and Industry 4.0, *Technological Forecasting & Social Change,* vol. 150.

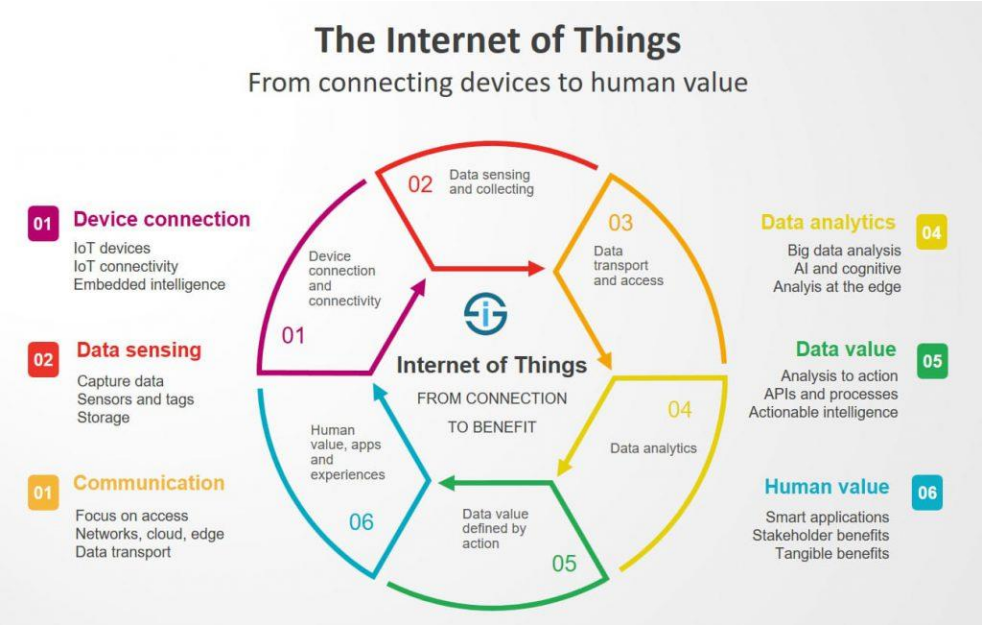

Fig. 1.3*: Le caratteristiche dell'Internet of Things.*
Fonte: i-SCOOP, 2020.

- Big Data Analytics: ciò che caratterizza la quarta rivoluzione industriale è l'uso intensivo di dati e di informazioni di qualsivoglia tipologia, e che vengono raccolti in ogni momento. La raccolta e l'uso di questi dati rappresentano le principali sfide per gli analisti e i manager, che supportano le decisioni sia a lungo che a breve termine, grazie alla loro costante disponibilità. Il nome Big Data è stato attribuito proprio in merito al fatto che se ne dispone di un'elevatissima quantità numerica, e anche per via della loro diversità; inoltre essi derivano da nuove fonti a vanno ad aggiungersi a quelli tradizionali gestiti dai database interni delle aziende. Questa combinazione crea un asset fondamentale al fine di migliorare molti aspetti aziendali, dalla value chain fino ai servizi offerti al consumatore finale.

Le soluzioni attualmente utilizzate saranno adottate e ottimizzate per l'Industria 4.0 al fine di raccogliere e valutare un immenso numero di dati provenienti da diverse risorse, fornendo così una procedura standard per i processi decisionali real-time, per cui l'analisi dei Big Data sta trasformando radicalmente il modo in cui le imprese operano e prendono decisioni strategiche nell'era dell'Industria 4.0. La capacità di analizzare grandi quantità di dati in tempo reale consente alle aziende di identificare tendenze e pattern che altrimenti rimarrebbero difficilmente individuabili (Wagner et al., 2017). Ad esempio, un produttore può utilizzare i Big Data Analytics per monitorare le prestazioni delle attrezzature in tempo reale, identificando rapidamente i segni di usura o malfunzionamento, e adottando perciò una manutenzione predittiva; così facendo si riducono i tempi di inattività non programmati e i costi di riparazione, migliorando l'efficienza operativa. Come punto focale, l'analisi dei Big Data permette alle aziende di ottimizzare i processi produttivi, grazie appunto alla possibilità di raccogliere i dati lungo la catena di produzione, permettendo così alle imprese di identificare colli di bottiglia, inefficienze e sprechi. Con queste informazioni, si possono apportare modifiche mirate per migliorare il flusso di lavoro e ridurre i costi operativi. Ad esempio, un'azienda può scoprire che

una specifica fase del processo di produzione causa ritardi frequenti, e dunque intervenendo su di essa l'azienda può velocizzare l'intera catena produttiva (Büchi et al., 2020).

L'analisi dei Big Data offre anche significativi vantaggi nella gestione della supply chain, dato che le aziende possono monitorare in tempo reale le condizioni e le performance dei fornitori, migliorando la visibilità lungo l'intera catena di approvvigionamento. Questo livello di trasparenza consente di rispondere rapidamente a eventuali problemi, come ritardi nelle consegne o problemi di qualità, riducendo il rischio di interruzioni nella produzione. Inoltre, le imprese possono ottimizzare l'inventario, riducendo i costi di stoccaggio e migliorando la disponibilità dei prodotti.

Un altro aspetto cruciale dei Big Data Analytics è la capacità di comprendere meglio i clienti e le loro esigenze; infatti, analizzando i dati raccolti dalle interazioni con i clienti, dai feedback e dalle tendenze di acquisto, le aziende possono sviluppare strategie di marketing più mirate e personalizzate. Questo non solo aumenta la soddisfazione del cliente, ma migliora anche i tassi di conversione e la fedeltà dei clienti. A titolo illustrativo, un'azienda può utilizzare l'analisi dei dati per segmentare il proprio mercato e creare campagne promozionali specifiche per ciascun segmento, aumentando l'efficacia delle sue iniziative di marketing. L'analisi dei dati è poi fondamentale anche per il processo decisionale strategico, poiché come riporta Wagner et al. (2017) in tal modo i dirigenti aziendali possono utilizzare i dati analizzati per prendere decisioni informate basate su evidenze concrete piuttosto che su intuizioni o supposizioni; così facendo si minimizza il rischio di errori e viene migliorata la qualità delle decisioni aziendali.

Una possibile applicazione concreta la si può trovare nel contesto in cui un'azienda stia pianificando di entrare in un nuovo mercato: in tal caso essa può analizzare i dati di mercato e i comportamenti dei consumatori per valutare la fattibilità e le potenziali sfide dell'espansione, aumentando le probabilità di successo. Come ultimo aspetto degno di nota vi è inoltre la possibilità di integrazione dei Big Data Analytics con altre tecnologie avanzate dell'Industria 4.0, come l'intelligenza artificiale e il machine learning, che amplifica ulteriormente le capacità analitiche delle imprese. Dato che queste tecnologie possono elaborare enormi quantità di dati con una velocità e una precisione superiori, identificando pattern complessi e fornendo previsioni accurate, permette alle aziende di anticipare le tendenze del mercato, adattarsi rapidamente ai cambiamenti e sfruttare nuove opportunità di business (Martinelli et al., 2021).

- Robotica avanzata e automazione: La robotica avanzata è un'altra delle componenti fondamentali dell'Industria 4.0, che consiste nell'utilizzo e impiego dei cobot, ossia un particolare tipo di robot collaborativi, progettati per lavorare fianco a fianco con gli esseri umani in ambienti di produzione. A differenza dei robot tradizionali, che spesso operano in celle isolate per motivi di sicurezza, i cobot sono costruiti con sistemi avanzati di sensori e software che permettono loro di percepire e reagire in tempo reale alla presenza umana. Questa caratteristica li rende ideali per svolgere compiti in cui l'interazione uomo-macchina è essenziale. Nel contesto produttivo la loro capacità di collaborare direttamente con gli operatori umani permette di combinare la precisione e l'efficienza automatizzata con la flessibilità e la creatività umana. Questo è particolarmente utile nelle linee di assemblaggio, dove i cobot possono eseguire operazioni ripetitive e precise, liberando gli operatori umani per compiti che richiedono maggiore destrezza o decisioni complesse. Inoltre, la programmazione dei cobot è spesso intuitiva e accessibile anche a chi non ha competenze avanzate in robotica, facilitando l'integrazione nelle linee produttive esistenti, come riporta Büchi et al. (2020).

Essi sono in grado, vista la loro natura automatizzata, di offrire una precisione e una velocità superiori rispetto ai processi manuali, ad esempio se impiegati per operazioni di assemblaggio, saldatura e movimentazione dei materiali, eliminando o riducendo in gran parte il fattore di errore umano.

I cobot contribuiscono anche a migliorare la sicurezza sul posto di lavoro, poiché, come precedentemente affermato, grazie ai loro sensori avanzati possono rilevare la presenza di un operatore nelle vicinanze e rallentare o fermarsi completamente per evitare collisioni. Questo riduce significativamente il rischio di incidenti rispetto ai robot tradizionali. In più, l'implementazione di cobot può aumentare l'ergonomia del lavoro umano, riducendo l'incidenza di infortuni legati a sforzi ripetitivi o movimenti scomodi. Un ulteriore beneficio dei cobot è la loro flessibilità operativa, visto che possono essere facilmente essere programmati per diverse attività, rendendoli ideali per le aziende che necessitano di adattarsi rapidamente a cambiamenti nella produzione o a nuove linee di prodotto. Questa flessibilità si traduce in una maggiore efficienza e competitività, consentendo alle imprese di rispondere più rapidamente alle esigenze del mercato. Inoltre, i cobot rappresentano una soluzione economica rispetto ai robot industriali tradizionali, sia in termini di costi iniziali che di manutenzione; infatti, la loro semplicità d'uso e la capacità di integrarsi facilmente con i sistemi esistenti permette di ridurre i tempi e i costi di implementazione, rendendoli accessibili anche alle piccole e medie imprese (Martinelli et al., 2021).

- Additive Manufacturing: l'additive manufacturing, comunemente noto come stampa 3D, è un processo di produzione che permette di realizzare oggetti tridimensionali aggiungendo strati successivi di materiale. A differenza dei metodi tradizionali di produzione, che spesso comportano la rimozione di materiale da un blocco più grande, l'additive manufacturing costruisce oggetti strato per strato secondo un modello digitale, senza dunque avere bisogno di stampi per produrre i componenti (questo è il principale punto forte di questa tecnologia). Tale metodo innovativo ha così rivoluzionato il modo in cui i prodotti vengono progettati, prototipati e fabbricati. Il processo inizia con la creazione di un modello digitale dell'oggetto da produrre, generalmente utilizzando software di progettazione assistita da computer (CAD). Una volta completato il modello, il file digitale viene convertito in un formato leggibile dalla stampante 3D, come il formato STL. La stampante 3D legge questo file e inizia a costruire l'oggetto aggiungendo strati successivi di materiale. Il tipo di materiale utilizzato può variare notevolmente, includendo plastiche, metalli, ceramiche e, in alcuni casi, materiali biologici (Büchi et al., 2020). Tecnicamente parlando, esistono diverse tecnologie di stampa 3D, ognuna con le proprie caratteristiche e applicazioni specifiche. Una delle tecnologie più comuni è la Fused Deposition Modeling (FDM), che utilizza un filamento di materiale termoplastico riscaldato e estruso attraverso un ugello per creare strati successivi. Un'altra tecnologia, forse quella maggiormente diffusa, è la stereolitografia (SLA), che utilizza un laser per solidificare strati di resina liquida fotopolimerizzabile. La Selective Laser Sintering (SLS), invece, utilizza un laser per sinterizzare polveri di materiale, creando strati solidi (Martinelli et al., 2021).

L'additive manufacturing offre numerosi vantaggi rispetto ai metodi di produzione tradizionali. Una delle principali caratteristiche distintive è la capacità di creare geometrie complesse e dettagliate che sarebbero difficili o impossibili da realizzare con altre tecniche. Questo è particolarmente utile per la produzione di parti personalizzate o su misura, come protesi mediche o componenti aerospaziali.

Infatti, ciò che caratterizza particolarmente questa innovazione, tipica della quarta rivoluzione, è proprio la possibilità di personalizzare il prodotto secondo le volontà del cliente differenziando tale produzione da quella di massa della seconda rivoluzione. La personalizzazione del prodotto comporta tuttavia anche alcuni svantaggi, in particolare quello relativo ai costi molto elevati che l'impresa deve affrontare per tutte le modifiche che vengono apportate al prodotto in modo da soddisfare ogni specifico cliente. Per questo motivo, non si considera questo tipo di manifattura come la più adatta a sostenere una produzione di massa. Ciononostante, grazie alla flessibilità della stampa 3D è possibile realizzare direttamente il prodotto completo senza dover assemblare le singole parti scomposte che costituiscono il prodotto finale influendo positivamente sui costi e soprattutto sul tempo, permettendo oltretutto di produrre un maggior numero di prodotti anche personalizzati e risolvendo così la questione della mancata capacità per le produzioni di massa. Inoltre, la stampa 3D riduce significativamente il tempo e i costi di prototipazione, visto che con i metodi tradizionali la creazione di un prototipo può richiedere anche settimane e comportare costi elevati. Con l'additive manufacturing invece, un prototipo può essere progettato, stampato e testato in pochi giorni, permettendo una rapida iterazione e miglioramento del design (Büchi et al., 2020).

Un altro vantaggio significativo è la riduzione degli sprechi di materiale, poiché l'additive manufacturing aggiunge materiale solo dove necessario, e in questo modo vi è anche un minor spreco rispetto ai metodi sottrattivi, che rimuovono materiale da un blocco iniziale. Questo non solo riduce i costi dei materiali, ma ha anche un impatto positivo sull'ambiente. Per quanto concerne gli impieghi, l'additive manufacturing sta trovando applicazioni in un'ampia gamma di settori, come l'industria automobilistica, dove viene utilizzata per creare prototipi di nuove parti e per la produzione di componenti leggeri e resistenti. Nell'ambito aerospaziale, la capacità di creare strutture complesse e leggere è particolarmente preziosa per la progettazione di parti di velivoli e satelliti, motivo per cui anche in questo caso la produzione additiva viene ampiamente utilizzata. Nel settore medicale, la stampa 3D è impiegata per produrre protesi su misura, impianti dentali e modelli anatomici per la pianificazione chirurgica. Un'area emergente dell'additive manufacturing è la biostampa, che utilizza materiali biologici per creare strutture tridimensionali come tessuti e organi. Di conseguenza, questa tecnologia ha il potenziale di rivoluzionare la medicina rigenerativa e i trapianti di organi, offrendo soluzioni personalizzate e riducendo la dipendenza dai donatori.

Nonostante i numerosi vantaggi, l'additive manufacturing presenta come menzionato in precedenza anche alcune sfide e problematiche di sorta. La qualità e le proprietà meccaniche dei pezzi stampati possono variare a seconda del materiale e della tecnologia utilizzata, e talvolta non si riesce ancora a raggiungere la qualità dei prodotti realizzati dai classici metodi sottrattivi; perciò, sono richiesti controlli di qualità piuttosto rigorosi (Martinelli et al., 2021). Inoltre, generalmente il costo di determinati macchinari risulta alquanto elevato, senza contare che la velocità di produzione può essere un limite per la produzione su larga scala, anche se i progressi tecnologici stanno migliorando questo aspetto.

- Cloud Computing: l'analisi delle tecnologie ha portato alla nascita del cloud computing, un sistema che ha il ruolo di centralizzare l'archiviazione dei dati e delle informazioni critiche presso le aziende. Con l'evoluzione della rete Internet e la capacità di raccogliere enormi quantità di dati in tempi brevi, è emersa la necessità di una rivoluzione nello stoccaggio dei dati.

Inizialmente, i dati venivano memorizzati su server fisici locali, ma la necessità di accedere alle informazioni in tempo reale e da qualsiasi luogo ha portato alla creazione del cloud computing, un insieme di servizi offerti on-demand da un fornitore a un cliente tramite Internet. Questo sistema consente agli utenti di poter fare a meno dell'acquisto di risorse hardware e software per lo scopo, ottenendo invece questi servizi attraverso una semplice connessione Internet, in base alle proprie esigenze. Il cloud computing è una tecnologia estremamente flessibile che permette di modificare in tempo reale le condizioni contrattuali con il fornitore in base alle proprie necessità (Büchi et al., 2020).

Tuttavia, una delle principali criticità associate all'adozione di un'infrastruttura cloud riguarda la sicurezza dei dati: infatti, oltre al rischio di perdita del pieno controllo sui propri dati e risorse, c'è anche il rischio di un oligopolio, con l'accentramento dei dati nelle mani di un numero limitato di aziende, spostandoli dal singolo hard disk a localizzazioni remote. Pertanto, è fondamentale che l'utente faccia un uso consapevole dei servizi cloud, valutando attentamente rischi e benefici, verificando l'affidabilità del fornitore e del servizio, esaminando le clausole contrattuali e adottando le necessarie misure di sicurezza per proteggere la confidenzialità dei dati.

Come dicevamo, le operazioni aziendali di oggi richiedono una quantità crescente di informazioni e una maggiore capacità di calcolo. Possedere questa capacità spesso comporta l'immobilizzazione di risorse finanziarie, causando inefficienze nella condivisione delle informazioni e riducendo la produttività a causa di un uso non ottimale delle risorse produttive. Il cloud computing può risolvere questi problemi offrendo una soluzione più efficiente e flessibile. Dal punto di vista gestionale del sistema cloud, ci sono diverse figure coinvolte:

1. Il provider di servizi, il quale offre uno o più servizi per lo stoccaggio e la trasmissione dei dati attraverso la rete, utilizzando normalmente un modello pay-per-use, che permette ai clienti di pagare solo per l'effettivo utilizzo del sistema.

2. L'amministratore, che agisce per conto del cliente, ed è responsabile dell'integrazione corretta tra il servizio cloud e i sistemi aziendali esistenti, coordinando le figure interne.

3. Il cliente finale, che è come detto l'utente che utilizza i servizi forniti dal provider con l'aiuto dell'amministratore.

Per quanto concerne il lato più tecnico, che si riporta schematizzato in figura 1.4, la struttura del cloud computing è suddivisa in due segmenti principali, il Front-End e il Back-End, interconnessi tramite Internet. Il Front-End comprende l'architettura che interagisce con il cliente e include gli elementi principali che influenzano l'esperienza utente (Martinelli et al., 2021). Questo segmento include il software, spesso un browser o un'applicazione cliente, che consente l'utilizzo dell'applicativo, l'interfaccia utente per l'interazione con il cloud e il dispositivo hardware utilizzato dal cliente. Grazie a questa configurazione, l'hardware non necessita di elevata potenza di calcolo poiché tutte le operazioni più complesse vengono elaborate nel cloud. Il Back-End include tutti gli elementi necessari per fornire il servizio in modo corretto e continuo. L'applicazione nel Back-End gestisce le interfacce utente e coordina le richieste della clientela verso il Back-end stesso. Il servizio offerto al cliente può comprendere vari task, come l'archiviazione dei dati, l'uso di ambienti di sviluppo per applicazioni e servizi web, e la gestione dei dati.

L'archiviazione è utilizzata per raccogliere tutti i dati necessari per il funzionamento del software cloud e può seguire diverse logiche architetturali a seconda dei servizi offerti. Il software di gestione è responsabile dell'allocazione delle risorse in base alle attività richieste (Büchi et al., 2020).

Parlando ora in termini di svantaggi, il difetto maggiormente significativo dei sistemi cloud è la minore disponibilità delle risorse rispetto ai server fisici; perciò, una gestione inefficiente potrebbe causare problemi nell'erogazione del servizio. Tuttavia, molte aziende stanno già utilizzando diversi software basati sul cloud per applicazioni aziendali e di analisi. Con l'avvento dell'Industria 4.0, un numero crescente di attività legate alla produzione richiederà una maggiore condivisione dei dati tra siti e confini aziendali, per cui le prestazioni delle tecnologie cloud miglioreranno, e saranno in grado di raggiungere tempi di reazione di pochi millisecondi. Di conseguenza, i dati e le funzionalità delle macchine saranno sempre più distribuiti nel cloud, permettendo l'offerta di più servizi basati sui dati per i sistemi di produzione.

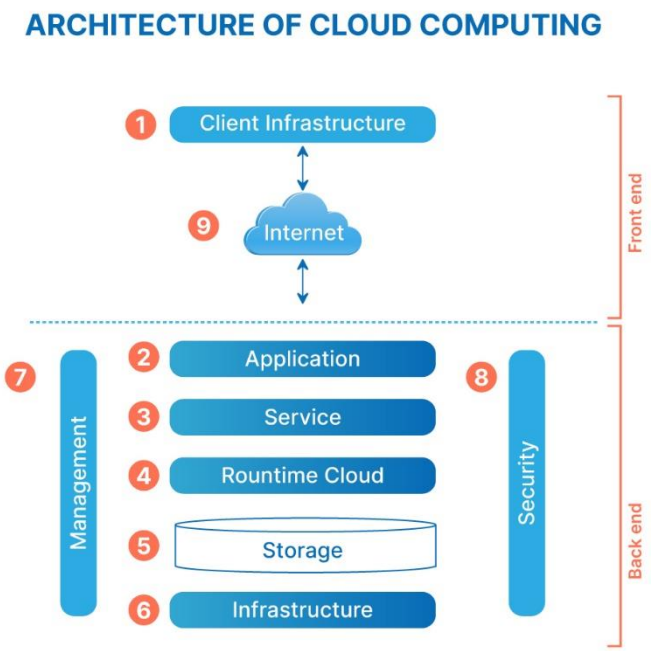

Fig. 1.4: *Schematizzazione della struttura del Cloud Computing.*
Fonte: Anshuman Singh, 2024.

- **Simulazione (Digital Twin)**: la simulazione dell'Industria 4.0 non è altro che l'impiego di strumenti virtuali in 3D in grado di creare una realtà che simuli quella fisica come ad esempio un prodotto, un materiale o un processo produttivo. Questa realtà prende il nome di Digital Twin, poiché consiste in una vera e propria replica virtuale che rispecchia fedelmente il suo corrispettivo fisico, utilizzando dati in tempo reale raccolti da sensori e altre fonti. La tecnologia dei Digital Twin permette dunque di simulare, analizzare e ottimizzare le performance di sistemi complessi senza intervenire fisicamente su di essi, riducendo significativamente i costi e i rischi associati. Questo permette di conseguenza anche di migliorare la qualità del prodotto e di ridurre i tempi di messa in opera, non essendo necessaria una riprogettazione che allungherebbe i tempi di uscita sul mercato.

Attualmente, le simulazioni 3D di prodotti sono già utilizzate nella fase di progettazione, ma in futuro le stesse potranno essere utilizzate in maniera più ampia anche nelle operazioni degli impianti. Queste simulazioni sfrutteranno i dati in tempo reale per rispecchiare il mondo fisico in un modello virtuale, che può includere macchine, prodotti e persone, consentendo agli operatori di testare e ottimizzare le impostazioni della macchina per il prossimo prodotto in linea nel mondo virtuale prima del cambio fisico, riducendone i tempi di configurazione e aumentando la qualità.

I Digital Twin trovano applicazione in diversi settori industriali, dal manifatturiero all'energia, dai trasporti all'edilizia. Nella produzione, ad esempio, un Digital Twin di una linea di assemblaggio può essere utilizzato per monitorare le operazioni in tempo reale, identificare colli di bottiglia e prevedere guasti delle attrezzature. Questo consente di adottare una manutenzione predittiva, prevenendo i tempi di inattività non pianificati e ottimizzando l'efficienza operativa. Inoltre, come vantaggio importantissimo, le aziende possono testare nuovi processi o modifiche senza interrompere la produzione reale, valutando l'impatto di questi cambiamenti in un ambiente virtuale sicuro (Martinelli et al., 2021). Per quanto concerne il settore energetico, i Digital Twin possono essere utilizzati per gestire e ottimizzare le operazioni di infrastrutture complesse come centrali elettriche o reti di distribuzione. In particolare, un gemello digitale di una turbina eolica può monitorare le condizioni operative e le prestazioni in tempo reale, prevedendo e prevenendo eventuali problemi prima che si verifichino. Questo approccio proattivo non solo migliora l'affidabilità e la longevità degli asset, ma riduce anche i costi di manutenzione e le interruzioni del servizio. Nel contesto dei trasporti invece, i Digital Twin possono migliorare la gestione delle flotte e delle infrastrutture, dato che tramite la copia digitale di un veicolo si possono monitorare continuamente le sue condizioni operative, ottimizzando la manutenzione e migliorando la sicurezza. Allo stesso tempo, i Digital Twin di infrastrutture come ponti e strade possono aiutare le autorità a monitorare le condizioni strutturali e a pianificare interventi di manutenzione più efficienti. Nei vari contesti industriali, anche l'edilizia beneficia significativamente dei Digital Twin per la gestione dei progetti di costruzione e la manutenzione degli edifici, essendoci la possibilità di creare un gemello digitale anche nel caso di edifici e strutture. Infatti, grazie a questo le imprese di costruzione possono simularne il processo di costruzione, identificare potenziali problemi e ottimizzare l'uso delle risorse.

Una volta completata la realizzazione, il Digital Twin dell'edificio in questione può essere utilizzato per monitorarne le prestazioni energetiche, gestirne la manutenzione e migliorare il comfort degli occupanti. Oltre a questo, lo studio di Martinelli et al (2021) evidenzia come uno degli aspetti più potenti e importanti dei Digital Twin sia la loro capacità di integrare dati storici e in tempo reale, permettendo alle aziende di effettuare analisi predittive e prescrittive. Grazie ad esse, le aziende possono utilizzare questi dati per prevedere scenari futuri e prendere decisioni con un elevato grado di informazione. Ad esempio, un'azienda di produzione può utilizzare i Digital Twin per simulare diverse strategie di produzione e identificare quella più efficiente e redditizia. Allo stesso modo, un operatore di rete elettrica può simulare l'impatto di eventi climatici estremi sulla rete e pianificare misure preventive per garantire la continuità del servizio. I Digital Twin non solo migliorano dunque l'efficienza operativa riducendo al contempo i costi, ma supportano anche l'innovazione e lo sviluppo di nuovi prodotti e servizi.

Le aziende, infatti, possono sperimentare nuove idee e tecnologie in un ambiente virtuale, accelerando il ciclo di sviluppo e diminuendo come detto prima il rischio di fallimento, e questo favorisce di conseguenza una maggiore agilità e competitività sul mercato. In più, come altro aspetto assolutamente da non sottovalutare, la tecnologia di simulazione promuove la collaborazione tra diverse funzioni aziendali. In particolare, in un progetto di sviluppo prodotto dove vi lavorano ingegneri, progettisti e operatori di produzione, grazie ai Digital Twin si crea la possibilità di farli lavorare insieme, utilizzando il gemello digitale per condividere informazioni e coordinare le attività. Questo approccio integrato migliora la comunicazione e la coerenza tra i team, portando a risultati migliori e a una maggiore efficienza.

- Realtà Aumentata (AR): l'augmented reality (AR), o realtà aumentata, consiste nell'aumento della percezione sensoriale tramite informazioni, manipolate e convogliate sotto forma di output elettrico non percepibili con i sensi umani. Nello specifico, la realtà aumentata utilizza un diagramma CAD 3D e attraverso dei sensori che mandano input ai vari dispositivi che contengono il CAD, come ad esempio smartphone, tablet o tramite cloud nel caso di occhiali e visiere, crea un'immagine in grado di avere una percezione totalmente diversa della realtà grazie all'aggiunta di elementi multimediali. Una delle principali applicazioni è nella manutenzione e riparazione degli impianti. Utilizzando dispositivi AR come gli smart glasses o tablet appunto, i tecnici possono visualizzare istruzioni passo dopo passo, sovrapposte direttamente sulle apparecchiature che stanno riparando, riducendo il tempo necessario per completare le riparazioni e aumentando la precisione. Questo non solo diminuisce i tempi di inattività ma migliora anche la sicurezza sul lavoro, poiché i tecnici possono mantenere le mani libere e concentrarsi sul compito da svolgere (Büchi et al., 2020).

Oltre a questo, i settori e le attività in cui è possibile applicare l'AR sono tra i più vari, a partire da quello delle costruzioni in cui i dispositivi digitali, capaci di aumentare la realtà, permettono di visualizzare l'immagine di un edificio ancora prima che la sua realizzazione sia conclusa in modo da ridurre al minimo gli errori. Ancora, essa può essere impiegata anche nel campo delle emergenze, in cui vengono trasmesse informazioni ricevute dai sensori in tempo reale a display o visiere dei vigili del fuoco con cui poter monitorare un incendio e le condizioni vitali delle persone. Anche il settore sanitario sta già sfruttando in modo rilevante la combinazione tra mondo virtuale e reale e ciò offre migliori opportunità di studio del caso e una sua risoluzione più efficace.

Nonostante questa tecnologia non sia ancora molto diffusa a livello aziendale, essa potrà essere utilizzata nei prossimi anni in tutti i settori per migliorare e assistere un'ampia gamma di attività produttive. Dopotutto, tale tecnologia emergente rappresenta potenzialmente una vera e propria rivoluzione del settore manifatturiero e molti altri settori industriali, dato il fatto che l'integrazione della realtà aumentata nelle operazioni industriali offre non solo numerosi vantaggi, ma è in grado di trasformare il modo in cui le aziende progettano, producono e manutengono i loro prodotti (Wagner et al., 2017). La realtà aumentata facilita inoltre anche la formazione dei dipendenti attraverso il cosiddetto virtual training, che permette di migliorare la preparazione dei tecnici integrando lo studio teorico con un'immediata applicazione pratica che prevede l'osservazione del lavoro che si deve svolgere (ad esempio, si possono visualizzare le parti di un macchinario per capirne il funzionamento e come poter agire correttamente con esse nella realtà). Questo metodo di formazione immersiva accelera l'apprendimento e migliora la ritenzione delle informazioni, rendendo i dipendenti più efficienti e competenti in meno tempo.

Per quanto riguarda il campo della progettazione e dell'ingegneria, la realtà aumentata permette agli ingegneri di visualizzare prototipi virtuali in scala reale, sovrapposti all'ambiente fisico. Questo facilita il processo di design, consentendo agli ingegneri di identificare e risolvere problemi potenziali prima che la produzione inizi (Wagner et al., 2017). La possibilità di manipolare e interagire con modelli 3D virtuali accelera il ciclo di sviluppo del prodotto e riduce i costi associati ai prototipi fisici. In più, anche la logistica e la gestione dei magazzini traggono beneficio dall'AR. Grazie a questa tecnologia, infatti, gli operatori di magazzino possono utilizzare dispositivi AR per navigare tra gli scaffali, visualizzare le informazioni sugli inventari e ottimizzare i percorsi di picking. Questo aumenta la precisione e la velocità delle operazioni di magazzino, migliorando così l'efficienza complessiva della supply chain. Infine, un altro aspetto importante della realtà aumentata consiste nel poter migliorare la collaborazione e la comunicazione all'interno dell'azienda e con partner esterni. Durante le riunioni o le revisioni di progetto, i team possono utilizzare dispositivi AR per visualizzare e discutere modelli virtuali in tempo reale, indipendentemente dalla loro posizione geografica. Questo facilita la condivisione delle conoscenze e accelera il processo decisionale, rendendo l'azienda più agile e reattiva (Martinelli et al., 2021).

- Cybersecurity: l'aumento della connettività tra i dispositivi comporta un incremento della necessità di proteggere i sistemi di produzione e le reti informatiche da potenziali minacce, dal momento che per l'Industria 4.0, ciò si traduce in un rischio maggiore di attacchi informatici. Per far fronte dunque a questa sfida, è essenziale adottare canali di comunicazione sicuri e sistemi di accesso avanzati. La cybersecurity comprende tutte quelle tecnologie che proteggono i sistemi informativi da attacchi che possono causare la perdita o la compromissione di dati sensibili. La frequenza di questi attacchi è purtroppo in costante aumento, poiché gli hacker puntano a compromettere la privacy e la sicurezza delle informazioni che, oltre a interessare le aziende, hanno rilevanza a livello nazionale. Infatti, hacker esperti possono infiltrarsi nelle reti utilizzando qualsiasi dispositivo, alterandole e manipolandole con facilità. Questo scenario provoca caos e destabilizzazione, causando perdite significative per le aziende in termini di clienti e profitto. Secondo l'Annual Cybersecurity Report del 2020 di Cisco[11], i dirigenti aziendali continuano a considerare la sicurezza una priorità, insieme ad altri indicatori come la definizione dei ruoli e di metriche chiare, nonché la valutazione del rischio informatico. Il rapporto in particolare evidenzia maggiori difficoltà nella gestione e nella sicurezza di ambienti multi-vendor, infrastrutture cloud e dispositivi mobili. Inoltre, secondo l'86% dei professionisti della sicurezza, l'uso di soluzioni di protezione nel cloud ha aumentato la visibilità nelle loro reti.

Questo sistema sempre più complesso e problematico mette seriamente a rischio la sicurezza informatica, poiché la trasformazione digitale comporta anche un cambiamento dell'infrastruttura, e ciò talvolta al di là della sicurezza risulta alquanto oneroso. Le difficoltà si ripercuotono poi anche sui professionisti della sicurezza, che devono affrontare continuamente nuove e svariate problematiche, come la necessità di contrastare minacce sofisticate da parte di attacchi hacker. Tuttavia, la trasformazione digitale rappresenta anche un'opportunità per i responsabili della sicurezza e per il settore IT, poiché possono sfruttarne l'uso per diventare più competitivi. Per affrontare questa complessità, le aziende stanno investendo sempre più nelle tecnologie di automazione, che assistono i responsabili della sicurezza nel rendere più rapide e reattive le tempistiche di contrasto agli attacchi.

[11] https://blogs.cisco.com/security/a-20-20-vision-for-cybersecurity;

L'adozione del cloud, inoltre, potenzia la visibilità all'interno dei sistemi e permette un coordinamento più funzionale tra i gruppi che si occupano dei vari aspetti della sicurezza, del networking e della comunicazione in rete. In sintesi dunque, la crescente interconnessione tra dispositivi aumenta il rischio di minacce informatiche, richiedendo una protezione robusta dei sistemi. La cybersecurity gioca un ruolo cruciale in questo contesto, offrendo soluzioni tecnologiche per difendere i dati sensibili e garantire la sicurezza delle informazioni. Nonostante le sfide, la trasformazione digitale offre opportunità per migliorare la competitività e l'efficacia della sicurezza informatica attraverso l'adozione di nuove tecnologie e strategie (Sarker et al., 2020)[12].

- Integrazione verticale e orizzontale dei sistemi informativi: la quarta rivoluzione industriale mira a creare un collegamento stretto e continuo tra tutte le fasi del ciclo produttivo, iniziando dalla ricerca e sviluppo fino al supporto post-vendita del cliente. L'obiettivo è dunque progettare sistemi integrati verticalmente. Tuttavia, questa integrazione non si limita solo alle operazioni interne, ma si estende anche ai sistemi orizzontali, coinvolgendo la catena di distribuzione (supply chain) per sincronizzare e coordinare le attività con altre aziende, come clienti e fornitori, migliorando così l'efficienza e la collaborazione, in accordo con Büchi et al. (2020). L'integrazione dei dati e dei sistemi lungo tutta la catena del valore consente a tutti i reparti e le funzioni aziendali di operare come un sistema unificato, ma per raggiungere una piena integrazione che assicuri il successo aziendale, è fondamentale combinare le tecnologie informatiche con quelle operazionali, anche se queste ultime sembrano appartenere a una realtà differente. Le tecnologie informatiche mirano a unificare le diverse unità aziendali per migliorare efficienza e coordinamento, mentre le tecnologie operazionali sono impiegate dalla forza lavoro e riguardano le attività manifatturiere. Solo con la convergenza di queste due tipologie di tecnologie si potrà ottenere l'efficienza desiderata nelle imprese, riducendo i costi e aumentando la competitività, portando a risultati superiori rispetto alla media dei concorrenti.

Attualmente, le funzioni aziendali a livello di officina non sono completamente integrate e anche l'ingegneria, dai prodotti agli impianti fino all'automazione, manca di una piena integrazione. Tuttavia, con l'avvento dell'Industria 4.0, aziende, reparti, funzioni e competenze possono diventare molto più interconnessi, evolvendo le reti di integrazione dei dati a livello universale e interaziendale.

Questa evoluzione permetterà di creare ecosistemi produttivi altamente efficienti e collaborativi, dove l'uso di tecnologie avanzate come l'IoT, l'IA e il Cloud Computing giocherà un ruolo cruciale nel trasformare il modo in cui le imprese operano, innovano e competono nel mercato globale.

- Intelligenza Artificiale: per ultima parliamo di quella che non è propriamente considerata una delle tecnologie abilitanti per via della sua caratteristica di incorporarsi ad altre di esse (principalmente a supporto del Big Data Analytics), ma che includeremo tra queste per il suo ruolo, comunque, assolutamente primario nel costituire l'essenza dell'Industria 4.0: l'intelligenza artificiale (IA). Essa consiste una disciplina tecnologica che mira a creare macchine capaci di eseguire compiti che richiedono intelligenza umana. Questi compiti possono includere l'apprendimento, la percezione, il riconoscimento del linguaggio naturale, la risoluzione di problemi e la presa di decisioni.

[12] Sarker I.H., Kayes A.S.M., Shahriar Badsha S., Alqahtani H., Watters P., and Ng A., 2020, Cybersecurity data science: an overview from machine learning perspective, *Journal of Big Data*, vol. 7, n. 41.

Nell'ambito dell'Industria 4.0, l'IA gioca un ruolo cruciale, trasformando profondamente i processi produttivi e operativi, dal momento che, in questo contesto, è fondamentale per l'analisi dei dati e per l'ottimizzazione dei processi nei più svariati modi.

La prima caratteristica fondamentale delle tecnologie basate sull'IA, come il machine learning e il deep learning, è la capacità di analizzare enormi volumi di dati raccolti da sensori e dispositivi connessi in tempo reale. Questo permette alle aziende di identificare pattern e tendenze che possono portare a miglioramenti significativi nella produzione, come la riduzione dei tempi di inattività, l'ottimizzazione della catena di approvvigionamento e l'aumento della qualità del prodotto finale (Büchi et al., 2020). Altro aspetto centrale dell'IA nell'Industria 4.0 è la manutenzione predittiva. Utilizzando algoritmi di machine learning, le aziende possono prevedere quando una macchina o un componente è destinato a guastarsi, basandosi su dati storici e attuali. Tale approccio consente di programmare interventi di manutenzione solo quando necessario, evitando costosi tempi di inattività non pianificati e prolungando così la vita utile delle attrezzature.

L'IA è anche essenziale per l'automazione dei processi, dato che i robot e i sistemi automatizzati dotati di intelligenza artificiale possono eseguire compiti complessi e ripetitivi con elevata precisione e velocità, rivoluzionando completamente la produzione e organizzazione delle aziende. Inoltre, questi sistemi possono adattarsi a nuove condizioni e apprendere dall'esperienza, migliorando continuamente le proprie prestazioni, ed una tale capacità di apprendimento e adattamento è particolarmente utile in ambienti di produzione dinamici, dove le condizioni possono cambiare rapidamente.

Oltre a questo, l'IA consente una pianificazione più accurata e reattiva anche nell'ambito relativo alla gestione della supply chain, poiché gli algoritmi che utilizza possono analizzare i dati provenienti da diverse fonti, come fornitori, clienti e mercati, per prevedere la domanda e ottimizzare l'inventario. Questo non solo riduce i costi di stoccaggio, ma migliora anche la soddisfazione del cliente attraverso consegne più rapide e precise (Martinelli et al., 2021).

L'intelligenza artificiale sta inoltre rivoluzionando il controllo qualità. In particolare, i sistemi di visione artificiale, che si servono di algoritmi di deep learning, possono ispezionare i prodotti in modo più accurato e veloce rispetto agli esseri umani, identificando difetti che potrebbero sfuggire all'occhio umano, il che porta a una riduzione degli scarti e ad un miglioramento complessivo della qualità del prodotto.

Un ulteriore settore dove l'IA sta avendo un impatto significativo è la personalizzazione della produzione, che permette alle varie imprese di differenziarsi dalla concorrenza. Grazie alla capacità di analizzare i dati dei clienti, infatti, le aziende possono creare prodotti su misura per soddisfare esigenze specifiche, aumentando la soddisfazione del cliente e aprendo nuove opportunità di mercato. Questo livello di personalizzazione è reso possibile dalla combinazione di big data e tecniche avanzate di intelligenza artificiale. Non bisogna poi dimenticare la sicurezza sul lavoro, che oggigiorno continua ad essere sempre più importante e richiesta, nonché necessaria, dove anche qui l'IA può fare una differenza sostanziale. In particolare, attraverso l'analisi dei dati provenienti da sensori e videocamere, i sistemi di IA possono monitorare continuamente l'ambiente di lavoro, identificando potenziali pericoli e prevenendo incidenti.

Inoltre, i robot collaborativi, noti come cobot e dotati di intelligenza artificiale, possono lavorare fianco a fianco con gli esseri umani, eseguendo compiti pericolosi o faticosi, riducendo così il rischio di infortuni. Infine, come ultimo aspetto generale ma non per questo meno importante, l'IA favorisce quella che è l'innovazione continua, grazie alla capacità di analizzare dati complessi e scoprire nuovi insight.

Questo permette alle aziende di sviluppare nuovi prodotti e servizi, migliorare quelli esistenti e ottimizzare i processi di produzione, stimolando di conseguenza la crescita e la competitività, e di avere la possibilità di rispondere rapidamente alle mutevoli esigenze del mercato. Da tutto ciò si conclude che l'IA sta radicalmente trasformando l'industria manifatturiera, aprendo a nuove opportunità e affrontando sfide complesse con soluzioni innovative. Con il continuo progresso delle tecnologie di intelligenza artificiale, il suo ruolo nell'Industria 4.0 è destinato a diventare sempre più centrale e determinante (Martinelli et al., 2021).

Tabella 2.1: *Riassunto delle tecnologie 4.0 e loro caratteristiche*

Ambito/area	Tecnologie abilitanti	Punti di forza	Criticità
Automazione e Robotica	- Automazione e Robotica	- Riduzione degli errori umani - Aumento della precisione e della velocità nei processi produttivi - Esecuzione di attività pericolose o ripetitive	- Elevati costi di implementazione iniziale - Resistenza del personale alla sostituzione dei ruoli - Rischi di disoccupazione tecnologica
Analisi dei Dati e Big Data	- Big Data Analytics - Machine Learning - Intelligenza Artificiale (IA)	- Ottimizzazione dei processi grazie ai dati in tempo reale - Capacità predittiva e miglioramento decisionale - Personalizzazione dei prodotti	- Complessità nella gestione e nella qualità dei dati raccolti - Richiede competenze tecniche avanzate - Problematiche legate alla privacy
Internet delle Cose (IoT)	- Sensori intelligenti - Reti interconnesse	- Monitoraggio continuo e ottimizzazione delle risorse - Maggiore controllo su processi produttivi - Integrazione di dispositivi connessi	- Vulnerabilità alla sicurezza informatica - Complessità nell'integrazione con sistemi esistenti - Elevati costi di manutenzione
Manifattura Additiva (3D)	- Stampa 3D - Tecnologie di prototipazione rapida	- Personalizzazione della produzione - Riduzione dei tempi di sviluppo del prodotto - Minore spreco di materiali	- Limitazioni sui materiali utilizzabili - Tempi di stampa ancora lenti per produzioni su larga scala - Elevati costi delle stampanti
Simulazione e Virtualizzazione	- Gemelli digitali - Realtà aumentata (AR) - Realtà virtuale (VR)	- Previsione di scenari futuri e ottimizzazione dei processi - Riduzione dei rischi con test virtuali - Miglioramento della formazione del personale	- Costo elevato delle tecnologie AR/VR - Difficoltà nella creazione di modelli realistici e accurati - Resistenza culturale al cambiamento
Cybersecurity	- Tecnologie cybersecurity - Blockchain	- Protezione dei dati sensibili e delle infrastrutture digitali - Riduzione dei rischi di attacchi informatici e frodi	- Complessità nella gestione della sicurezza in ambienti connessi - Alto costo e necessità di aggiornamento continuo delle soluzioni
Integrazione Orizzontale e Verticale	- ERP avanzati - Sistemi di gestione interconnessi	- Maggiore efficienza nella catena di fornitura - Coordinamento tra settori diversi dell'impresa - Flessibilità nella produzione	- Difficoltà nell'integrazione con sistemi legacy - Rigidità nei flussi produttivi - Necessità di cambiamenti culturali organizzativi
Cloud Computing	- Infrastrutture cloud - Servizi SaaS e PaaS	- Flessibilità e scalabilità delle risorse informatiche - Riduzione dei costi IT - Accesso remoto ai dati e alle applicazioni aziendali	- Preoccupazioni sulla sicurezza dei dati - Dipendenza da fornitori esterni - Possibili problemi di latenza e connettività

2 CAPITOLO 2: GLI IMPATTI OPERATIVI

2.1 Premesse

Come abbiamo già avuto modo di vedere l'Industria 4.0 rappresenta una delle rivoluzioni più profonde e trasformative nella storia moderna della produzione industriale, in quanto caratterizzata dall'integrazione delle tecnologie digitali nei processi produttivi dal potenziale fortemente impattante su di essi, che abbiamo potuto conoscere poc'anzi, e che proprio per questo hanno già trasformato in modo significativo il modo in cui le aziende gestiscono i loro impianti produttivi e interagiscono con il mercato.

In questa sezione ci concentreremo in particolare su ciò che accade a livello operativo, parlando innanzitutto delle applicazioni delle tecnologie 4.0, ed in particolare partendo dai sistemi di controllo e supervisione, che rappresentano uno degli aspetti centrali di questa trasformazione. Essi consentono alle aziende di monitorare in tempo reale lo stato delle macchine e delle linee di produzione, rilevando anomalie, gestendo i cicli produttivi e migliorando l'efficienza complessiva.
Un altro importante ambito di applicazione dell'Industria 4.0 è rappresentato dai sistemi di automazione del magazzino, così come l'automazione dei processi industriali in generale.
La logistica interna, grazie all'automazione avanzata e all'utilizzo di robot autonomi, è in grado di ottimizzare il flusso dei materiali, riducendo i tempi di attesa e garantendo una gestione più efficiente degli spazi e delle scorte. Dal lato invece maggiormente macroscopico della fabbricazione industriale, l'automazione consente un notevole incremento della flessibilità nella produzione, soprattutto grazie all'integrazione dei cobot e software avanzati di controllo alla catena di produzione, è possibile riconfigurare rapidamente le linee di produzione in funzione delle esigenze del cliente, consentendo una produzione altamente personalizzata senza sacrificare i benefici della produzione di massa, riducendo al contempo gli sprechi grazie ad una migliore gestione delle risorse ed operazioni, senza per di più rinunciare alla qualità. In tal senso, l'Industria 4.0 non si limita a ottimizzare i processi esistenti, ma ridefinisce il concetto di personalizzazione, rendendo possibile la produzione su misura su larga scala (Wagner et al. 2017).

Approfondiremo inoltre uno dei benefici chiave dell'Industria 4.0, ovvero l'uso dei Big Data nell'ottica di analizzare tali dati e prendere di conseguenza decisioni in modo efficiente. Sappiamo che infatti i dati raccolti dai sensori installati nelle macchine possono essere utilizzati per predire guasti, ottimizzare la produzione e migliorare l'efficienza operativa. Attraverso l'analisi avanzata, come riportano Martinelli et al. (2021), le aziende sono in grado di trasformare enormi quantità di dati grezzi in informazioni utili per prendere decisioni più informate e tempestive. Questo approccio basato sui dati rende possibile un miglioramento continuo dei processi produttivi e l'adattamento dinamico alle esigenze di mercato.

In aggiunta, oltre all'efficienza, l'Industria 4.0 ha un impatto significativo anche sulla capacità che le diverse funzioni e reparti aziendali hanno di comunicare e collaborare fra di loro. L'integrazione dei sistemi di produzione con le reti aziendali permette a tutte le funzioni, dal management alle operazioni, di accedere in tempo reale alle informazioni necessarie per garantire il corretto funzionamento della fabbrica intelligente. Secondo Wagner et al. (2017) la collaborazione tra operatori umani e macchine intelligenti è fondamentale per rendere le organizzazioni più agili e competenti al fine di rispondere rapidamente ai cambiamenti nel contesto competitivo.

Non bisogna però trascurare la dimensione operativa legata al consumo energetico delle tecnologie smart, che è assolutamente cruciale soprattutto adesso che l'Industria 4.0 sta consistentemente prendendo piede nel mondo della produzione e del lavoro. L'efficienza energetica difatti è diventata una priorità per le aziende impegnate nell'ottimizzazione dei costi operativi e nella riduzione dell'impatto ambientale, e anche se l'Industria 4.0 introduce sistemi intelligenti per il monitoraggio e la gestione dell'energia, che consentono di ridurre il consumo energetico senza compromettere le performance produttive, oltre a sensori avanzati e algoritmi di intelligenza artificiale che possono monitorare in tempo reale l'uso dell'energia e proporre azioni correttive per massimizzare l'efficienza, il peso dei costi relativi a questi consumi (oltre alla questione ambientale) rimane talvolta ancora un'enorme barriera per molte imprese (Rosa et. al., 2019)[13].

Verranno considerati infine gli aspetti legati alla sicurezza dei dati, che come segnalato da Sarker et al. (2020), a causa dell'aumento dell'interconnessione tra macchine e sistemi, rappresenta una sfida più che mai fondamentale, dal momento che la protezione delle informazioni industriali e dei sistemi di controllo è diventata una priorità per prevenire attacchi cibernetici e garantire l'integrità dei dati raccolti e analizzati. In tale ottica sarà dunque prioritaria la necessità di formare adeguatamente il personale, onde evitare conseguenze che possono facilmente essere catastrofiche per l'esistenza stessa dell'azienda.

2.2 Le applicazioni delle tecnologie 4.0

2.2.1 Sistemi di controllo e supervisione

È dopotutto un dato di fatto che la sicurezza dei sistemi di automazione e controllo industriale (IACS) dipenda fortemente dalla robustezza dei protocolli di rete sottostanti di controllo di supervisione e acquisizione dati (SCADA) di cui è dotata l'impresa (tra gli altri fattori, come il PLC). Ciò diventa particolarmente evidente se si considera la misura in cui alcuni protocolli, progettati con meccanismi di sicurezza scadenti o inesistenti, hanno portato a un numero considerevole di segnalazioni di incidenti passati che hanno colpito infrastrutture critiche e servizi essenziali. Considerando la situazione attuale, è assolutamente comprensibile il motivo per cui il corretto audit e l'analisi dei protocolli SCADA siano considerati fondamentali quando si tratta di progettare e/o proteggere le infrastrutture IACS. Questi sistemi di controllo e supervisione sono dunque elemento cruciale nell'Industria 4.0, essenziali per garantire che le operazioni produttive siano efficienti, reattive alle esigenze in tempo reale e soprattutto sicure (Rosa et. al., 2019).

Questi sistemi utilizzano una combinazione di hardware e software avanzati per monitorare, gestire e ottimizzare i processi industriali, consentendo alle aziende di raggiungere livelli superiori di automazione e controllo, collocandosi in tal modo nella mezzeria della piramide dei vari livelli dell'automazione, indicata in figura 2.1.

[13] Rosa L., Freitas M., Mazo S., Monteiro E., Cruz T. and Simões P., 2019, A Comprehensive Security Analysis of a SCADA Protocol: From OSINT to Mitigation, IEEE, vol. 7, pp. 42156 – 42168.

In una fabbrica moderna, i sistemi di controllo e supervisione operano attraverso reti di sensori IoT che raccolgono dati su vari parametri come temperatura, umidità, pressione, velocità di produzione e stato delle macchine, i quali vengono poi trasmessi a piattaforme centralizzate, dove vengono analizzati in tempo reale. Utilizzando algoritmi avanzati e intelligenza artificiale, i sistemi possono identificare anomalie, prevedere malfunzionamenti e ottimizzare le operazioni per migliorare l'efficienza e ridurre i tempi di inattività. Questi sistemi non solo monitorano le condizioni attuali, ma possono anche eseguire azioni correttive automatiche. Ad esempio, se un sensore rileva un problema di sovraccarico in una macchina, il sistema può automaticamente rallentare o fermare l'operazione per prevenire danni, avvisando al contempo gli operatori umani affinché intervengano. Questo livello di automazione riduce significativamente il rischio di errori umani e migliora dunque anche la sicurezza complessiva.

La supervisione centralizzata permette inoltre una visione olistica dell'intero processo produttivo. Gli operatori inoltre possono visualizzare dashboard interattivi che mostrano lo stato in tempo reale di tutte le macchine e processi, facilitando una gestione più efficace delle risorse e una rapida risposta ai problemi. Tali sistemi supportano anche la manutenzione predittiva, utilizzando dati storici e modelli predittivi per determinare quando una macchina potrebbe aver bisogno di manutenzione, evitando così costosi tempi di fermo non pianificati. Anche in questo caso, tramite l'integrazione di cloud computing con i sistemi di controllo e supervisione si aggiungono ulteriori benefici, come la scalabilità e l'accesso remoto: le aziende in tal modo, infatti, possono archiviare enormi quantità di dati nel cloud, permettendo analisi approfondite e l'uso di intelligenza artificiale per migliorare continuamente i processi. Inoltre, i manager e gli ingegneri possono accedere ai dati e controllare i sistemi da qualsiasi parte del mondo, consentendo una gestione più flessibile e reattiva.

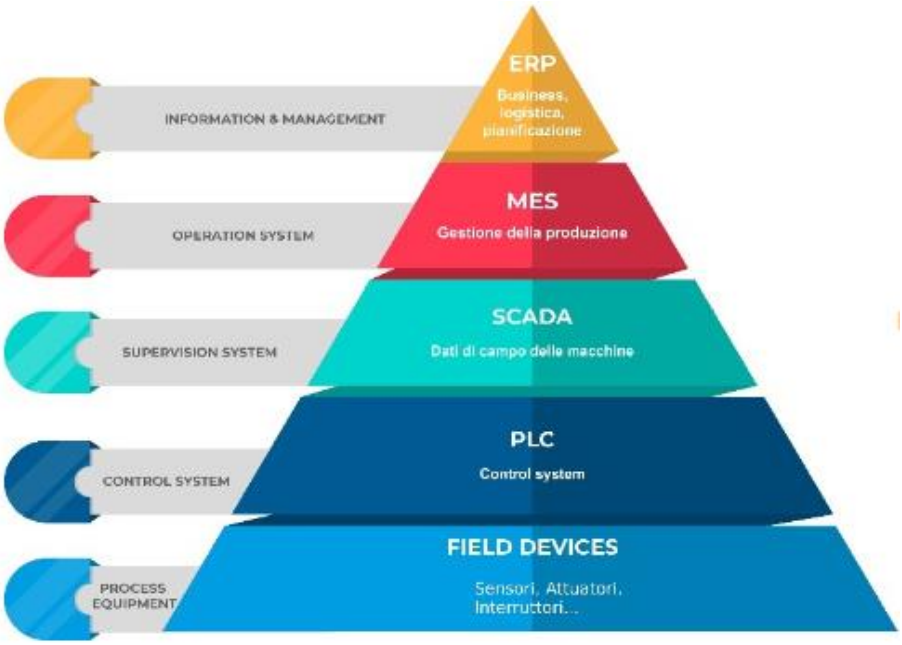

Fig. 2.1: *La piramide dell'automazione.*
Fonte: EXPERTISE, Reference Project Engineering, tech, 2022.

Un altro aspetto cruciale dei sistemi di controllo e supervisione è la loro capacità di supportare la personalizzazione della produzione. Con la crescente domanda di prodotti personalizzati, questi sistemi permettono alle aziende di adattare rapidamente le linee di produzione per soddisfare specifiche esigenze dei clienti senza compromettere l'efficienza. Questo rende possibile la produzione di piccoli lotti o anche di singoli pezzi su richiesta, mantenendo comunque un elevato livello di produttività.

2.2.2 Sistemi di automazione del magazzino

La gestione automatizzata del magazzino è un altro aspetto chiave dell'automazione nell'Industria 4.0, ed essa è resa possibile grazie ai sistemi di smistamento automatizzati e ai veicoli a guida autonoma (AGV), che migliorano l'efficienza delle operazioni di stoccaggio e movimentazione dei materiali. Questi sistemi utilizzano la visione artificiale e la robotica per ottimizzare i flussi di lavoro, riducendo i tempi di movimentazione e migliorando la precisione di diverse operazioni. Dunque, tali sistemi rappresentano una vera e propria rivoluzione del modo in cui le imprese gestiscono l'inventario, la movimentazione delle merci e la logistica. Essi combinano tecnologie avanzate come robotica, intelligenza artificiale, sensori IoT e software di gestione per creare ambienti di magazzino altamente efficienti, sicuri e flessibili. In un magazzino automatizzato, robot e droni sono spesso utilizzati per diverse operazioni come il picking, l'imballaggio e lo stoccaggio delle merci. Questi robot possono muoversi autonomamente attraverso il magazzino, navigando con precisione grazie a sensori e algoritmi di navigazione avanzati: essi sono in grado, infatti, di identificare e prelevare gli articoli richiesti, trasportarli alle stazioni di imballaggio e persino caricarli su veicoli per la spedizione. Questo livello di automazione riduce drasticamente la necessità di intervento umano, aumentando la velocità e l'efficienza delle operazioni.

L'intelligenza artificiale poi gioca un ruolo fondamentale nei sistemi di automazione dei magazzini, poiché vengono utilizzati algoritmi di machine learning, che analizzano continuamente i dati raccolti dai sensori IoT e dai robot per ottimizzare i percorsi di movimentazione, prevedere la domanda futura e gestire l'inventario in tempo reale. Questo permette alle aziende di ridurre i tempi di inattività, minimizzare gli errori di picking e migliorare la precisione dell'inventario.

Inoltre, l'IA può identificare colli di bottiglia nei processi e suggerire miglioramenti operativi, contribuendo a un flusso di lavoro più snello ed efficiente. In secondo luogo, la gestione dell'inventario è un altro aspetto cruciale migliorato dai sistemi di automazione dei magazzini, grazie all'uso di sensori IoT che monitorano costantemente i livelli di inventario, segnalando automaticamente quando è necessario rifornire determinati prodotti. Questo sistema di gestione proattivo evita l'esaurimento delle scorte e riduce l'accumulo di eccedenze, ottimizzando l'uso dello spazio di magazzino e migliorando il capitale circolante (Oyekanlu et al., 2020)[14].

[14] Oyekanlu E.A., Alexander C. Smith, Windsor P. Thomas, Grethel Mulroy, Dave Hitesh, Matthew Ramsey, David J. Kuhn, Jason D. Mcghinnis, Steven C. Buonavita, Nickolus A. Looper, Mason Ng, Anthony Ng'oma, Weimin Liu, Patrick G. Mcbride, Michael G. Shultz, Craig Cerasi, And Dan Sun, 2020, A Review of Recent Advances in Automated Guided Vehicle Technologies: Integration Challenges and Research Areas for 5G-Based Smart Manufacturing Applications, *IEEE access* 8, pp. 202312-202353.

Abbiamo in aggiunta anche la possibilità di integrazione di software di gestione dei magazzini (WMS) e sistemi di gestione dei trasporti (TMS), attraverso i quali si ottiene una visione unificata delle operazioni di logistica e stoccaggio. Il WMS coordina tutte le attività di magazzino, dalla ricezione delle merci all'invio dei prodotti finiti, mentre il TMS ottimizza la pianificazione delle spedizioni e il tracciamento dei veicoli. Questa sinergia tra WMS e TMS migliora la trasparenza e la coordinazione lungo tutta la catena di approvvigionamento, riducendo i tempi di consegna e i costi operativi, andando ad integrarsi con il sistema ERP (Enterprise Resource Planning). Esso è un tipo di piattaforma completa e integrata, in modalità on-premise o nel cloud, che gestiscono tutti gli aspetti di un business basato sulla produzione o sulla distribuzione. Inoltre, i sistemi ERP supportano tutti gli aspetti della gestione finance, delle risorse umane, della supply chain e del manufacturing con la tua principale funzione di contabilità. I sistemi ERP offrono una visione chiara dell'intero processo di business monitorando tutti gli aspetti della produzione, della logistica e degli aspetti finanziari. Questi sistemi integrati fungono da hub centrale per il flusso di lavoro e i dati end-to-end dell'azienda, consentendo l'accesso a una vasta gamma di reparti.

In particolare, come schematizzato in figura 2.2, il sistema ERP emette le informazioni sull'ordine di cui il TMS ha bisogno per preparare ed eseguire le spedizioni. Oltre alle informazioni di base, come il nome e l'indirizzo del cliente, il flusso di dati dal sistema ERP include anche informazioni dettagliate sugli articoli per garantire che vengano spediti i prodotti giusti. Il TMS restituisce i dettagli della spedizione di cui il sistema ERP ha bisogno per le sue funzioni di contabilità e gestione degli ordini, come il numero di tracciamento, il nome del corriere e i costi. Il TMS può anche comunicare in modalità wireless informazioni relative agli articoli nel veicolo di un conducente in modo che il conducente possa aggiornare i dati della spedizione quando una consegna è stata completata. In tutto questo, il ruolo del WMS è quello di aiutare gli utenti a gestire le attività di evasione, spedizione e ricezione nel magazzino o nel centro di distribuzione, come il prelievo di merci dagli scaffali per la spedizione o lo stoccaggio delle merci ricevute.

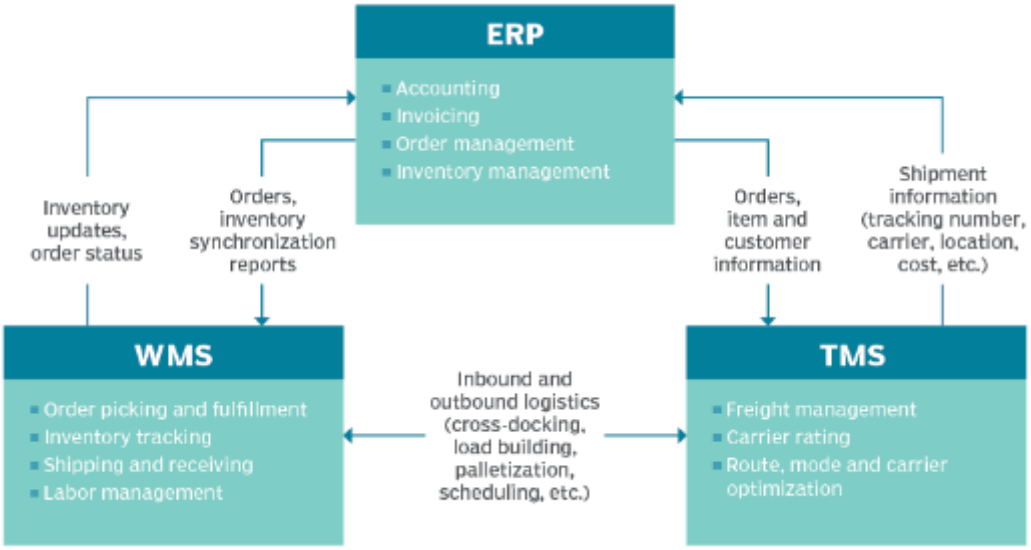

Fig. 2.2: *Modalità di come i sistemi della supply chain elaborano gli ordini.*
Fonte: Kirvan P. et al., 2024.

Inoltre, il suo compito nell'inventario è quello di tracciare i dati di stoccaggio che arrivano dai lettori di codici a barre e dai tag di identificazione a radiofrequenza (RFID) e aggiornare il modulo di gestione dell'inventario nel sistema ERP per garantire che abbia le informazioni più recenti (Kirvan P. et al., 2024)[15].

In più, la sostenibilità è un altro beneficio derivante dall'automazione dei magazzini. I sistemi automatizzati possono essere progettati per ottimizzare il consumo energetico, utilizzando, ad esempio, illuminazione e climatizzazione intelligente che si attivano solo quando necessario. Inoltre, la precisione nella gestione dell'inventario riduce gli sprechi e migliora l'efficienza delle risorse, contribuendo a un'operazione più ecologica. Un ulteriore vantaggio dell'automazione dei magazzini è la capacità di scalare rapidamente le operazioni per rispondere a picchi di domanda, visto che durante periodi di alta attività, come le stagioni di vendita o le promozioni speciali, i sistemi automatizzati sono in grado di aumentare il ritmo delle operazioni senza richiedere significativi aumenti del personale. Questo permette alle aziende di mantenere un servizio di alta qualità anche sotto pressione. Infine, la sicurezza dei lavoratori è notevolmente migliorata grazie all'automazione, poiché i robot e i sistemi automatizzati possono assumere compiti pericolosi o ripetitivi, riducendo il rischio di incidenti e infortuni, permettendo in questo modo agli operatori umani di concentrarsi invece su compiti di supervisione e gestione, lavorando in un ambiente più sicuro ed ergonomico (Rosa et. al., 2019).

2.2.3 Automazione dei processi industriali

L'automazione dei processi industriali comprende l'uso di software avanzati per il controllo e la gestione delle operazioni produttive, primi fra tutti i Manufacturing Execution System (MES), che integrano una grande varietà di processi di produzione, dalla pianificazione alla gestione delle risorse, migliorando la trasparenza e la tracciabilità.

Questi sistemi permettono di ottimizzare l'uso delle risorse, ridurre gli sprechi e migliorare la qualità del prodotto finale: essi sono una delle risorse più importanti dell'era dell'Industria 4.0, poiché rappresentano la spina dorsale delle operazioni produttive moderne (Wagner et al., 2017). Questi sistemi monitorano, tracciano e controllano tutte le fasi del processo di produzione in tempo reale, fornendo una visione completa e dettagliata delle attività di fabbrica.

L'integrazione dei MES con altre tecnologie avanzate come l'IoT, l'IA e il Cloud Computing permette alle aziende di ottimizzare la produzione, migliorare la qualità e aumentare l'efficienza operativa. In particolare, i MES raccolgono dati da varie fonti all'interno dello stabilimento, inclusi macchinari, sensori IoT, robot e sistemi di automazione, per analizzarli in tempo reale per fornire informazioni dettagliate sulle prestazioni delle macchine, l'avanzamento della produzione e la qualità dei prodotti. Questa visibilità consente ai manager di prendere decisioni informate e tempestive, rispondendo rapidamente a qualsiasi problema che possa sorgere, come guasti delle macchine, difetti di produzione o inefficienze operative. Un aspetto cruciale dei MES è la loro capacità di tracciare e gestire la genealogia del prodotto.

[15] Kirvan P., Essex D. and Kakade S., 2024, Definition: transportation management system (TMS), *TechTarget.*

Questo significa che ogni singolo componente di un prodotto finito può essere tracciato attraverso tutte le fasi del processo produttivo, dal ricevimento delle materie prime fino alla spedizione del prodotto finito. Tale tracciabilità è essenziale per garantire la qualità e la conformità ai regolamenti, soprattutto in settori altamente regolamentati come l'industria alimentare, farmaceutica e automobilistica. Inoltre, in caso di problemi di qualità, i MES permettono di identificare rapidamente e con precisione l'origine del problema, facilitando le azioni correttive e minimizzando i costi associati ai richiami di prodotto (Wagner et al., 2017).

La pianificazione e la programmazione della produzione sono altri aspetti chiave gestiti dai MES: attraverso l'utilizzo di algoritmi avanzati, i MES possono ottimizzare i piani di produzione per massimizzare l'efficienza delle risorse, ridurre i tempi di setup e minimizzare i tempi di inattività delle macchine. Questa ottimizzazione permette alle aziende di rispondere più rapidamente alle variazioni della domanda del mercato e di migliorare la loro capacità di consegnare i prodotti in tempi brevi. I MES sono anche strumenti potenti per il miglioramento continuo della produzione. Attraverso l'analisi dei dati storici e in tempo reale, i MES possono identificare tendenze e modelli che indicano opportunità di miglioramento. Ad esempio, possono rilevare che una determinata macchina ha un tasso di guasto più elevato del previsto o che un particolare processo è soggetto a variazioni di qualità.

Queste informazioni possono essere utilizzate per implementare modifiche nei processi produttivi, aggiornare le procedure di manutenzione preventiva e formare il personale per migliorare le prestazioni complessive della fabbrica. Inoltre, come evidenzia Wagner et al. (2017), l'integrazione dei MES con altri sistemi aziendali, come i sistemi ERP, crea una sinergia che ottimizza l'intera catena di fornitura, poiché i dati raccolti dai MES possono essere condivisi con il sistema ERP per migliorare la pianificazione delle risorse, la gestione degli inventari e la logistica. In sostanza il MES (come di solito viene infatti considerato) funge da anello di congiunzione tra l'ERP, ovvero il livello decisionale, e il livello operativo, costituito dalla produzione. Tale integrazione assicura che tutte le parti dell'organizzazione lavorino con le stesse informazioni aggiornate, migliorando la coerenza e la coordinazione tra i vari dipartimenti.

Oltre a questo, la sostenibilità è un'altra area in cui i MES possono fare la differenza, dato che attraverso il monitoraggio e l'analisi dell'uso delle risorse come energia, acqua e materie prime, i MES possono aiutare le aziende a identificare opportunità per ridurre i consumi e migliorare l'efficienza delle risorse. Questo non solo contribuisce a ridurre i costi operativi, ma anche a minimizzare l'impatto ambientale delle attività produttive, allineandosi con le crescenti aspettative di sostenibilità dei consumatori e delle normative. Infine, i MES possono migliorare la collaborazione e la comunicazione all'interno dell'azienda, poiché forniscono una piattaforma centralizzata dove tutte le informazioni sulla produzione sono accessibili in tempo reale, facilitando la collaborazione tra operai, tecnici, manager e altri stakeholder. Questa trasparenza migliora la risoluzione dei problemi, la gestione delle risorse e la capacità di adattarsi rapidamente ai cambiamenti, creando un ambiente di lavoro più coordinato ed efficiente.

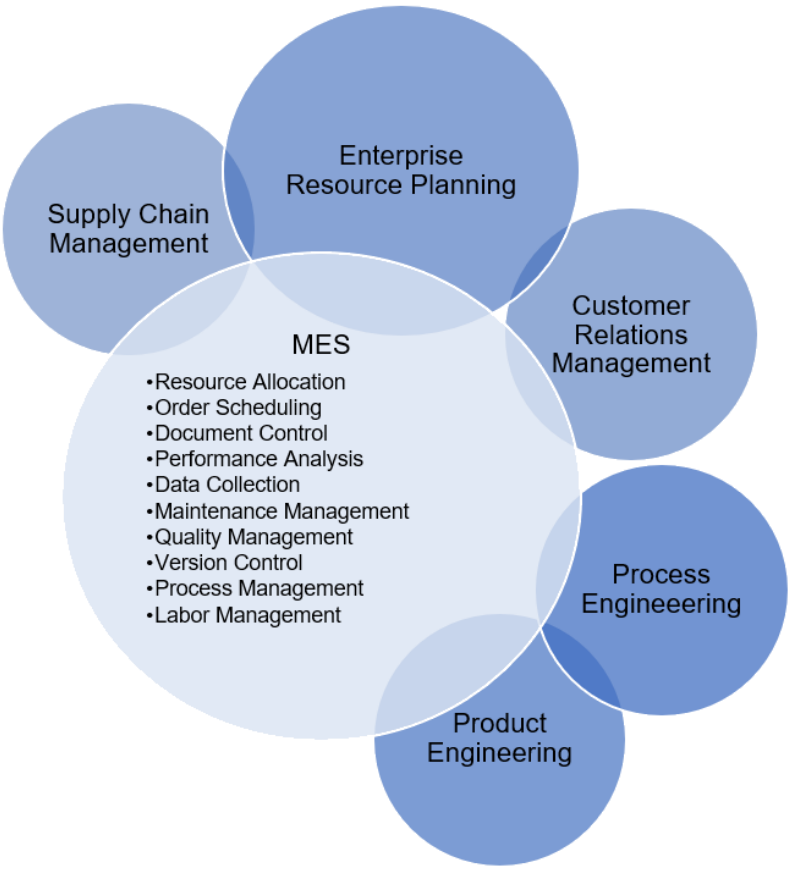

Fig. 2.3: *Funzioni e vantaggi del MES.*
Fonte: Henriques P., 2023.

2.3 Benefici degli impatti operativi

Qui di seguito ogni aspetto vantaggioso portato dall'Industria 4.0 sarà trattato con la spiegazione relativa delle varie caratteristiche, e verrà poi supportato con due case study che ne mostreranno delle concrete applicazioni e risultati positivi sul campo, oltre a rimarcarne l'importanza ed efficacia.

2.3.1 Cambiamenti nell'automazione e nell'efficienza operativa

Come abbiamo visto, l'adozione di tecnologie avanzate nell'Industria 4.0 porta a numerosi benefici, che secondo Wagner et al. (2017) in sintesi si possono schematizzare in questo modo:

- *Aumento della produttività:* l'implementazione di tecnologie automatizzate e sistemi avanzati permette di eseguire operazioni complesse con maggiore velocità, precisione e continuità rispetto ai processi manuali. Le macchine automatizzate possono lavorare 24 ore su 24 senza pause, aumentando il volume della produzione e riducendo i tempi di ciclo. Inoltre, l'automazione consente di ridurre i colli di bottiglia lungo la linea produttiva, massimizzando il throughput complessivo e migliorando l'efficienza operativa. I sistemi di robotica avanzata ed i macchinari CNC possono non solo operare a velocità molto più elevate rispetto agli operatori umani incrementando così la produzione di massa, ma sono anche in grado di mantenere una qualità maggiormente uniforme.

- *Riduzione dei costi operativi:* l'automazione riduce significativamente la dipendenza dalla manodopera diretta, diminuendo i costi legati ai salari, ai turni di lavoro e alla gestione delle risorse umane. Soprattutto le tecnologie di manutenzione predittiva permettono di prevenire guasti ai macchinari, riducendo i tempi di fermo e ottimizzando l'utilizzo delle risorse. Inoltre, i sistemi automatizzati migliorano la gestione energetica, riducendo i consumi energetici grazie a processi di produzione più efficienti e mirati. Questi risparmi nei costi operativi consentono alle aziende di migliorare i margini di profitto e di reindirizzare risorse verso investimenti in innovazione e ricerca.

- *Miglioramento della qualità del prodotto:* i sistemi automatizzati, programmati per eseguire operazioni ripetitive con estrema precisione, minimizzano l'errore umano e riducono i difetti di produzione. Le macchine intelligenti e i sensori IoT integrati nelle linee produttive monitorano continuamente la qualità, identificando e correggendo eventuali anomalie in tempo reale. Questo assicura una qualità costante e una riduzione degli scarti, aumentando la soddisfazione del cliente. In più, l'uso di sensori avanzati per il controllo qualità in tempo reale può rilevare microdifetti non visibili all'occhio umano, garantendo standard più elevati.

- *Maggiore flessibilità:* le tecnologie 4.0 permettono di riconfigurare rapidamente le linee di produzione, passando da un prodotto all'altro senza richiedere lunghi tempi di setup o costosi cambiamenti fisici delle attrezzature. Ciò risulta particolarmente vantaggioso nei settori che richiedono una personalizzazione su larga scala, come l'industria automobilistica e l'elettronica di consumo. Grazie alla combinazione di robotica modulare e software di gestione avanzata della produzione, le aziende possono rispondere rapidamente alle mutevoli esigenze del mercato e alle preferenze dei clienti. Questo tipo di flessibilità consente una produzione più reattiva e su misura, senza compromettere l'efficienza operativa o la qualità del prodotto finale.

Riferendoci nello specifico ad un esempio di implementazione di soluzioni IoT e automazione avanzata in modo da dimostrare la possibilità di concretizzare questi quattro punti, prendiamo in esame il caso rappresentato da Siemens AG, un gigante industriale globale con sede in Germania. Questa azienda è nota per integrare e fare un uso massiccio di tecnologie avanzate dell'Industria 4.0 per migliorare l'automazione e l'efficienza operativa, attraverso l'implementazione del sistema di automazione industriale Totally Integrated Automation (TIA) nei suoi stabilimenti di produzione. In particolare, questa piattaforma integra software e hardware per garantire che tutte le operazioni produttive siano coordinate e ottimizzate, mentre parallelamente vengono utilizzati sensori IoT per raccogliere dati in tempo reale sulle operazioni di produzione, i quali vengono poi analizzati per identificare inefficienze, prevedere manutenzioni e ottimizzare i processi produttivi. Come risultato l'integrazione del sistema TIA ha portato ad un aumento significativo della produttività, grazie alla riduzione dei tempi di fermo e alla migliore coordinazione delle operazioni, oltre ad una diminuzione dei costi operativi del 10-15% grazie all'automazione e all'ottimizzazione delle risorse, migliorando la qualità del prodotto finale e riducendo al contempo i difetti di produzione (Annanth et al., 2021)[16].

[16] Annanth V. K., Abinash M. and Rao L.B., 2021, Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A case study of siemens industry**,** *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1969.

Un altro esempio è General Electric (GE), una delle multinazionali più conosciute e influenti nel mondo dell'industria e della tecnologia, che ha adottato l'Industria 4.0 per trasformare le sue operazioni produttive, implementando tecnologie di digitalizzazione e manutenzione predittiva in vari stabilimenti. In particolare, GE utilizza la piattaforma Predix, un sistema basato su Cloud per l'analisi dei dati industriali, raccogliendo dati da macchine e sensori per fornire analisi in tempo reale. Ciò permette come già sappiamo la possibilità di attuare una manutenzione predittiva, che utilizza machine learning e analisi dei dati per prevedere quando le macchine richiedono manutenzione, prevenendo guasti e riducendo i tempi di inattività. L'adozione della piattaforma Predix ha permesso a GE di migliorare l'efficienza operativa del 20%, riducendo i costi associati ai tempi di fermo e alle riparazioni non pianificate, e dall'altro lato la manutenzione predittiva ha portato a una riduzione del 15% nei costi di manutenzione, portando ad un miglioramento dell'affidabilità delle attrezzature e riducendo allo stesso tempo del 10% il consumo energetico grazie all'ottimizzazione dei processi produttivi e all'uso più efficiente delle risorse (Chen Y., 2017)[17].

Questi case study di Siemens AG e General Electric dimostrano come l'Industria 4.0 possa portare a significativi miglioramenti nell'automazione e nell'efficienza operativa delle imprese. L'adozione di tecnologie avanzate come l'IoT, l'analisi dei dati e la manutenzione predittiva non solo ottimizza i processi produttivi, ma riduce anche i costi operativi e migliora la qualità del prodotto finale, contribuendo a una maggiore sostenibilità aziendale.

2.3.2 Personalizzazione e flessibilità della produzione

Come precedentemente discusso, l'Industria 4.0 ha profondamente modificato il concetto di flessibilità e personalizzazione nella produzione, portando a cambiamenti concreti in vari aspetti della gestione aziendale. Prima dell'avvento delle tecnologie avanzate, la personalizzazione era vista come un processo costoso e limitato, poiché richiedeva adattamenti specifici delle linee di produzione che rallentavano l'intero processo e comportavano notevoli spese. Oggi, invece, i sistemi produttivi sono molto più agili e adattabili, permettendo alle aziende di rispondere rapidamente e in modo efficiente alle richieste specifiche dei clienti senza compromettere i volumi produttivi.

In termini di flessibilità, l'Industria 4.0 permette alle aziende di modificare le linee di produzione in modo dinamico per gestire diversi tipi di prodotti. Questo si traduce nella capacità di passare rapidamente da un prodotto all'altro o di introdurre nuovi design senza interruzioni significative. La flessibilità si manifesta anche nella possibilità di gestire piccole serie personalizzate senza perdere l'efficienza caratteristica della produzione di massa. Questo aspetto è particolarmente importante in settori come quello automobilistico o dell'elettronica di consumo, dove le esigenze dei clienti possono cambiare rapidamente e richiedere modifiche immediate. Inoltre, la flessibilità nella produzione moderna permette una gestione più efficiente delle risorse e riduce gli sprechi. Le aziende possono adattare la produzione in base alla disponibilità delle materie prime o alle condizioni operative,

[17] Chen Y., 2017, Integrated and Intelligent Manufacturing: Perspectives and Enablers, *Engineering*, vol. 3, n. 5, pp. 588-595.

assicurando che ogni fase del processo produttivo sia ottimizzata per minimizzare il consumo energetico e i costi operativi. Questo porta a un modello produttivo più sostenibile e resiliente, in grado di adattarsi sia alle esigenze interne che esterne in modo agile ed efficiente.

Una conseguenza tangibile è la capacità di adattarsi alle fluttuazioni del mercato in tempo reale. L'Industria 4.0 ha reso possibile per le aziende monitorare costantemente la domanda e adattare i cicli produttivi di conseguenza. Se, per esempio, c'è un picco improvviso nella domanda di un particolare prodotto, le aziende possono regolare immediatamente la produzione senza dover affrontare lunghe procedure di riprogrammazione delle macchine o riorganizzazioni del personale. Questo non solo riduce i costi, ma permette di rispondere tempestivamente alle opportunità di mercato, aumentando la competitività Anche il grado di personalizzazione è migliorato in modo sostanziale perché le aziende ora possono creare prodotti su misura per le esigenze specifiche dei clienti, spesso in modo completamente automatizzato. Questo approccio, noto come "mass customization", combina i vantaggi della produzione di massa con la personalizzazione dei singoli prodotti, permettendo ai clienti di configurare le caratteristiche del prodotto in base ai loro gusti o necessità (Martinelli et al., 2021).

Anche in questo caso, citiamo in esempio la più che nota Adidas, una delle principali aziende globali nel settore dell'abbigliamento sportivo e delle attrezzature, la quale ha sviluppato dei particolari stabilimenti di produzione altamente automatizzati situati in Germania e negli Stati Uniti, denominati *Speedfactories*, che si avvalgono di tecnologie avanzate come la stampa 3D e i robot collaborativi per produrre scarpe da ginnastica personalizzate. Non solo, i clienti possono perfino "progettare" le proprie scarpe online, potendo sceglierne i colori, i materiali e le caratteristiche specifiche, e ricevere il prodotto finito in tempi significativamente ridotti rispetto alla produzione tradizionale. Questa flessibilità ha permesso ad Adidas di rispondere rapidamente alle tendenze del mercato e alle esigenze individuali dei clienti, migliorando la soddisfazione del cliente e riducendo i tempi di consegna (Adidas IT)[18].

Anche per quanto riguarda la flessibilità e la personalizzazione delle linee produttive, GE rappresenta ancora una volta un caso più che degno di nota, in quanto ha introdotto il concetto delle cosiddette *Brilliant Factories*, che rappresenta l'apice della trasformazione digitale nell'industria manifatturiera. Questo sistema in particolare si basa sull'integrazione avanzata delle tecnologie digitali nei processi di produzione per creare impianti di produzione altamente efficienti, intelligenti e interconnessi, attraverso la combinazione di IoT, analisi dei dati, IA e altre tecnologie avanzate per ottimizzare ogni aspetto del processo produttivo. Uno dei principali obiettivi delle Brilliant Factories è migliorare la produttività e l'efficienza riducendo i tempi di inattività delle macchine, ottimizzando l'uso delle risorse e migliorando la qualità dei prodotti finali. Questo viene realizzato attraverso l'uso di sensori IoT che raccolgono dati in tempo reale sulle operazioni delle macchine e dei processi produttivi. Questi dati vengono poi analizzati tramite algoritmi di machine learning e IA per identificare inefficienze, prevedere guasti e suggerire interventi di manutenzione preventiva. Una delle peculiarità delle Brilliant Factory è che le macchine possono comunicare tra loro e con un sistema centrale, condividendo informazioni sulle loro condizioni operative e prestazioni.

[18] https://www.adidas.it/?open-privacy-settings=gdpr&redirect-url=aHR0cHM6Ly93d3cuYWRpZGFzLml0L3NwZWVkZmFjdG9yeQ==

Ad esempio, se un sensore rileva una possibile anomalia in una macchina, il sistema può prevedere un guasto imminente e programmare automaticamente un intervento di manutenzione, minimizzando i tempi di fermo e evitando costosi arresti della produzione. Inoltre, dato che l'analisi avanzata dei dati come sappiamo consente una pianificazione della produzione più flessibile e reattiva, le aziende possono adattare rapidamente le loro linee di produzione alle variazioni della domanda del mercato e di conseguenza personalizzare i prodotti in accordo con le esigenze dei clienti e ridurre il time-to-market.
Oltre a ciò, l'ottimizzazione dei processi produttivi e l'uso efficiente delle risorse contribuiscono a ridurre il consumo energetico e l'impatto ambientale, dal momento che l'analisi dei dati può identificare le aree di spreco energetico e suggerire modifiche per migliorare l'efficienza energetica. Le Brilliant Factories di GE utilizzano anche la realtà aumentata (AR) e la realtà virtuale (VR) per migliorare la formazione dei lavoratori e la manutenzione delle attrezzature, facendo in modo che gli operatori possano utilizzare dispositivi AR per visualizzare informazioni in tempo reale sulle macchine, seguire istruzioni di manutenzione step-by-step e diagnosticare problemi con maggiore rapidità ed efficacia (Brilliant Manufacturing from GE Digital)[19].

2.3.3 Analisi dei dati e decision making

L'Industria 4.0 è caratterizzata da un massiccio impiego di tecnologie di raccolta e analisi dei dati (tramite Big Dati Analytics e IoT) che trasformano il modo in cui le aziende prendono decisioni. Queste tecnologie come abbiamo visto consentono una visione più approfondita e soprattutto in tempo reale delle operazioni aziendali, facilitando decisioni più informate, rapide e strategiche. In particolare, l'analisi dei dati e il decision making nell'Industria 4.0 comportano vari aspetti chiave:

1) Analisi dei dati:

- *Machine Learning e Intelligenza Artificiale*: gli algoritmi di machine learning e IA analizzano i dati raccolti per identificare pattern, prevedere tendenze future, e suggerire miglioramenti operativi.

- *Analisi predittiva*: l'analisi predittiva utilizza modelli statistici e algoritmi di machine learning per prevedere futuri risultati basati su dati storici e attuali. Questo può aiutare le aziende a ottimizzare la produzione, gestire meglio le scorte, e migliorare la pianificazione strategica.

- *Analisi descrittiva e diagnostica*: l'analisi descrittiva aiuta a capire cosa è successo in passato, mentre l'analisi diagnostica cerca di spiegare il perché è successo. Questi tipi di analisi sono dunque assolutamente fondamentali per migliorare i processi e risolvere i problemi operativi (Wagner et al., 2017).

2) Decision Making:

- *Decisioni basate sui dati:* l'analisi avanzata dei dati permette alle aziende di prendere decisioni basate su evidenze concrete piuttosto che su intuizioni o esperienze passate, per cui ne consegue un aumento della precisione delle decisioni e una diminuzione dei rischi.

[19] General Electric, 2017*, Brilliant Manufacturing from GE Digital*.

- *Ottimizzazione in tempo reale:* le tecnologie di analisi dei dati consentono alle aziende di monitorare e ottimizzare le operazioni in tempo reale. Così facendo, le fabbriche possono regolare immediatamente i parametri di produzione in risposta ai dati in tempo reale raccolti dai sensori IoT, migliorando l'efficienza e riducendo gli sprechi (Wagner et al., 2017).

Come case study si prende in esame l'esempio fornito da una delle più grandi e conosciute aziende multinazionali al mondo, specializzata nella produzione di beni di consumo, Procter & Gamble (P&G), che fa un uso massiccio di sensori IoT e Big Data Analysis. Questi strumenti permettono all'azienda di monitorare in tempo reale la produzione e ridurre i tempi di inattività delle macchine attraverso la manutenzione predittiva, che ha portato a una riduzione del 20% dei guasti. L'analisi avanzata ha inoltre migliorato la qualità del prodotto, riducendo i difetti del 15% grazie alla correzione in tempo reale di eventuali anomalie durante la produzione. In termini di efficienza della propria catena di approvvigionamento, l'ottimizzazione dell'inventario e il miglioramento delle previsioni di domanda hanno ridotto i costi di magazzino del 10%, consentendo all'azienda di rispondere rapidamente alle fluttuazioni del mercato e di ottimizzare i tempi di consegna. Complessivamente, P&G ha visto un miglioramento del 25% nell'efficienza operativa, dimostrando come l'integrazione di dati e IoT possa trasformare i processi produttivi tradizionali (Procter & Gamble website)[20].

Anche Siemens ha integrato soluzioni di analisi dei dati e IA nei suoi processi di produzione per migliorare l'efficienza e la qualità, nello specifico utilizzando la piattaforma industriale IoT MindSphere, un sistema basato su cloud, progettato per raccogliere, analizzare e utilizzare i dati provenienti da macchinari e infrastrutture industriali. Questa innovativa piattaforma consente la connessione di un'ampia gamma di dispositivi e sensori, indipendentemente dal produttore, e questa sua capacità di interoperabilità è cruciale per raccogliere dati da diverse fonti e sistemi eterogenei. Non solo, la piattaforma raccoglie dati in tempo reale dai dispositivi connessi, permettendo alle aziende di monitorare continuamente le operazioni e di mantenere un archivio storico dei dati per analisi future, inoltre utilizza strumenti avanzati di analisi dei dati e intelligenza artificiale per interpretare i dati raccolti. Questo consente di identificare pattern, prevedere guasti e ottimizzare i processi produttivi. MindSPhere in più garantisce anche elevati standard di sicurezza per la protezione dei dati, inclusi protocolli di crittografia e accessi controllati, conformi alle normative internazionali (Petrik et al., 2019)[21].

2.3.4 Comunicazione e collaborazione

Anche la comunicazione e la collaborazione tra i vari organi aziendali interni ed esterni sono aspetti cruciali che vengono notevolmente potenziati grazie alle tecnologie avanzate. La quarta rivoluzione industriale introduce infatti una serie di strumenti e piattaforme che lo rendono possibile, come l'IoT, il Cloud Computing (che conosciamo bene) e anche le tecnologie adibite alla comunicazione unificata: si tratta in particolare di strumenti come le videoconferenze, i sistemi di messaggistica

[20] https://it.pg.com

[21] Petrik D. and Georg Herzwurm G., 2019, iIoT Ecosystem Development through Boundary Resources. A Siemens MindSphere Case Study, *Engineering*, pp. 1-6.

istantanea e le piattaforme di collaborazione virtuale (es. Microsoft Teams, Slack), che permettono una comunicazione più efficiente e immediata tra i dipendenti. Queste tecnologie riducono le barriere geografiche, consentendo riunioni virtuali e brainstorming in tempo reale, migliorando la sinergia tra i team (Martinelli et al., 2021). Oltre ad essi, sono poi i vari settori aziendali che beneficiano notevolmente dell'implementazione di queste tecnologie, e principalmente ciò riguarda:

- *Collaborazione uomo-macchina*: con l'introduzione dei cobot e dell'intelligenza artificiale, le operazioni di produzione diventano come già discusso più integrate. I cobot, infatti, lavorano al fianco degli operatori umani, migliorando la produttività e riducendo il rischio di errori, mentre l'IA può supportare i lavoratori umani fornendo analisi predittive e raccomandazioni basate sui dati raccolti in tempo reale (Wagner et al., 2017).

- *Supply chain collaborativa*: l'Industria 4.0 facilita una maggiore trasparenza e collaborazione lungo la catena di approvvigionamento, dal momento che le aziende possono condividere dati con i propri fornitori e partner logistici al fine di ottimizzare i processi di approvvigionamento e distribuzione. Questo approccio collaborativo può ridurre i tempi di consegna, ottimizzare i livelli di inventario e migliorare la risposta alle esigenze del mercato.

- *Piattaforme di innovazione aperta*: le aziende possono utilizzare delle particolari piattaforme di innovazione, dette di "innovazione aperta", per collaborare con università, centri di ricerca, startup e altri partner esterni. Queste piattaforme facilitano la condivisione di idee e tecnologie innovative, accelerando dunque lo sviluppo di nuovi prodotti e soluzioni. Ad esempio, molte grandi aziende del settore tecnologico utilizzano i cosiddetti "hackathon" e "innovation contest" per raccogliere nuove idee da una comunità globale di sviluppatori, attraverso degli eventi intensivi durante le quali programmatori, imprenditori, sviluppatori, designer ed altri professionisti del settore tecnologico si riuniscono al fine di collaborare alla creazione di progetti innovativi, soluzioni software e prototipi.

Portando infine degli esempi aziendali, prendiamo nuovamente in esame la General Electric, ed in particolare la sua piattaforma per l'IoT industriale: Predix, che, come avevamo già discusso, rappresenta una componente fondamentale nella digitalizzazione delle operazioni industriali. Oltre alle sue caratteristiche innovative menzionate in precedenza, la piattaforma facilita anche la comunicazione tra diversi settori aziendali e con i clienti, dato che le informazioni raccolte e analizzate sono rese accessibili a vari stakeholder, migliorando così la trasparenza e la collaborazione tra i vari organi aziendali di competenza (Chen Y., 2017).

Un altro Case Study è rappresentato da BMW, che ha sviluppato una rete molto vasta di fabbriche intelligenti interconnesse, dove i macchinari sono dotati di sensori e dispositivi IoT che consentono il monitoraggio remoto in tempo reale. Questa capacità di monitoraggio e comunicazione permette di raccogliere dati preziosi sulle operazioni, identificare potenziali problemi e intervenire tempestivamente per evitare interruzioni della produzione. Non solo, infatti questa rete è progettata per essere altamente flessibile e adattabile, e dunque ogni fabbrica è equipaggiata con tecnologie avanzate che permettono la personalizzazione di massa dei veicoli. Grazie all'uso di robotica avanzata, stampa 3D e IA, le fabbriche possono rispondere rapidamente alle richieste del mercato e personalizzare i prodotti secondo le esigenze specifiche dei clienti. L'integrazione di queste tecnologie quindi non solo aumenta l'efficienza, ma anche la qualità del prodotto finale.

Oltre a ciò, la comunicazione tra i macchinari all'interno delle fabbriche BMW è facilitata dall'uso di piattaforme digitali e protocolli standardizzati, e questo perché i dati raccolti dai sensori vengono inviati a sistemi centrali di gestione, dove vengono poi analizzati attraverso l'uso di algoritmi IA e di machine learning. Questo processo permette come abbiamo avuto modo di discutere di prevedere eventuali guasti e di pianificare la manutenzione in modo proattivo, riducendo i tempi di fermo e migliorando l'efficienza operativa complessiva. In più, il monitoraggio remoto consente ai manager di produzione di avere una visione completa delle operazioni in tempo reale. Questo significa che hanno la facoltà di poter controllare lo stato delle macchine, le prestazioni dei processi produttivi e la qualità dei prodotti in ogni momento. Queste piattaforme permettono infine una comunicazione molto fluida e una gestione efficiente della supply chain. I fornitori possono infatti condividere informazioni critiche sempre in tempo reale, come le disponibilità di materie prime e i tempi di consegna, e questa condivisione di dati è assolutamente essenziale per garantire che la produzione non sia interrotta da ritardi o mancanze di materiali, e in più migliora anche la visibilità lungo tutta la catena di approvvigionamento, permettendo così una gestione reattiva e agile in caso di imprevisti (BMW Group - Innovation)[22].

2.4 Sfide e considerazioni

In questa ultima sezione vedremo le principali criticità che conseguono agli impatti operativi, poiché certamente essi non possono solo portare i vantaggi e vari benefici che abbiamo visto; e anche se sono sicuramente gestibili meritano la dovuta attenzione, poiché non esiste impresa che non dovrà necessariamente affrontarli.

2.4.1 Consumo energetico delle tecnologie

Le tecnologie avanzate, come i data center per il cloud computing, i server e i dispositivi IoT, richiedono una notevole quantità di energia, sollevando la questione cruciale di bilanciare i benefici offerti dalle tecnologie digitali con l'impatto energetico e ambientale che queste comportano. Primi fra tutti i data center, che sono essenziali per il funzionamento di servizi cloud e applicazioni digitali, sono ben noti per il loro alto consumo energetico; dunque, l'adozione di soluzioni di efficienza energetica è fondamentale per ridurre questo impatto. Ad esempio, il raffreddamento ad acqua può rappresentare una valida soluzione, in quanto si tratta di una tecnologia che consente di migliorare l'efficienza del raffreddamento dei data center, comportando una diminuzione del consumo di energia rispetto ai tradizionali sistemi di raffreddamento ad aria. Inoltre, anche l'uso di energie rinnovabili, come l'energia solare o eolica, può ulteriormente ridurre l'impronta ecologica dei data center, rendendo più sostenibile l'alimentazione delle infrastrutture digitali.

Oltre a questi aspetti, anche il monitoraggio e l'ottimizzazione del consumo energetico sono cruciali per migliorare l'efficienza complessiva delle operazioni, ed essi sono attuabili principalmente attraverso i sistemi di monitoraggio IoT, che vengono integrati nei data center e in altre infrastrutture energetiche e permettono di raccogliere dati in tempo reale sul consumo energetico, i quali possono

[22] https://www.bmwgroup.com

essere poi analizzati per identificare inefficienze e implementare misure correttive. Ad esempio, l'ottimizzazione dei carichi di lavoro nei data center mediante l'uso di algoritmi avanzati, può distribuire in modo più equilibrato il carico di lavoro tra gli stessi, riducendo così il consumo di energia e migliorando l'efficienza operativa.

Al contempo, tuttavia, altro aspetto importante è la gestione dell'energia in questi dispositivi IoT, che per giunta sono sempre più diffusi in vari settori, dalle smart home all'industria, e dunque è necessario che siano progettati per minimizzare il consumo energetico. Soprattutto le tecnologie come il power management avanzato e la comunicazione a bassa potenza sono essenziali per prolungare la durata della batteria e ridurre l'impatto energetico complessivo. Queste ultime in particolare consentono ai dispositivi IoT di comunicare tra loro utilizzando una quantità minima di energia, prolungando la durata della batteria e rendendo praticabili le applicazioni IoT in ambienti dove il cambio frequente delle batterie non è possibile. Per il primo si intende una serie di tecnologie e pratiche progettate per gestire l'uso dell'energia nei dispositivi elettronici in modo più efficiente, con l'obiettivo principale di ridurre il consumo energetico senza compromettere le prestazioni (Khan R. and Kumar P.., 2020)[23].

2.4.2 Sicurezza dei dati

Come abbiamo già avuto modo di approfondire nella sezione legata alla Cybersecurity, l'integrazione delle tecnologie digitali nelle aziende porta con sé una serie di rischi significativi legati alla sicurezza dei dati. Con l'aumento dell'interconnessione tra reti e dispositivi, infatti, la superficie di attacco per i cybercriminali si espande in modo esponenziale, rendendo le aziende più suscettibili a intrusioni e violazioni di dati. La protezione dei dati sensibili è diventata quindi una priorità critica per le organizzazioni, che devono adottare misure di sicurezza avanzate per prevenire accessi non autorizzati e garantire l'integrità delle informazioni, soprattutto perché la gestione del flusso di dati e la loro archiviazione è ancora relativamente acerba, e perciò essi sono a maggior ragione più vulnerabili, come sostengono Sarker et al. (2020). Essi riportano inoltre, che ad esempio, nel 2010, erano meno di 50 milioni gli unici eseguibili di malware conosciuti dalla comunità della sicurezza. Nel 2012 erano poi raddoppiati, arrivando a circa 100 milioni, e nel 2019 vi sono stati più di 900 milioni di eseguibili dannosi noti alla comunità della sicurezza, fino ad arrivare alla fine del 2023 a circa 6,06 miliardi. La criminalità informatica e gli attacchi possono causare perdite finanziarie devastanti e colpire anche organizzazioni oltre agli individui. Si stima che una violazione dei dati costi 8,19 milioni di dollari per gli Stati Uniti e 3,9 milioni di dollari in media, e in primis, la protezione dei dati sensibili richiede l'implementazione di una serie di strategie e tecnologie per far fronte a questi problemi.

A tal proposito la crittografia, una delle principali misure di sicurezza che viene utilizzata per garantire che i dati siano leggibili solo dalle parti autorizzate, può rappresentare una prima soluzione. La crittografia difatti può essere applicata sia ai dati in transito, durante la trasmissione attraverso reti, sia ai dati a riposo, archiviati nei database aziendali, ma non dimentichiamo che oltre ad essa è essenziale l'uso di firewall per monitorare e controllare il traffico di rete, impedendo l'accesso non autorizzato ai sistemi interni.

[23] Khan R., and Kumar P., 2020, Low Power Wide Area Networks for IoT Applications: Opportunities, Challenges, and Directions. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 206714-206744.

Una seconda alternativa è rappresentata dai sistemi di rilevamento delle intrusioni (IDS) e dai sistemi di prevenzione delle intrusioni (IPS), che vengono utilizzati per identificare e bloccare attività sospette o malevole all'interno della rete aziendale. Nello specifico questi sistemi analizzano il traffico di rete in tempo reale e possono rispondere automaticamente a minacce rilevate, mitigando potenziali danni. In aggiunta un altro elemento fondamentale della protezione dei dati è senza dubbio la gestione degli accessi, ma questa può essere ovviata efficacemente attraverso i sistemi di autenticazione a più fattori (MFA) per garantire che solo gli utenti autorizzati possano accedere a risorse sensibili. Per quanto concerne invece la compliance con le normative sulla protezione dei dati, si può dire che essa sia altrettanto critica: infatti numerose norme o regolamenti, come il General Data Protection Regulation (GDPR) in Europa, impongono rigidi requisiti sulla gestione e la protezione delle informazioni personali.

Le aziende devono dunque garantire la conformità a queste normative e tenere da conto tutte le criticità riportate dall'Agenzia dell'UE per la Cybersecutiy (figura 2.4), adottando misure per la protezione dei dati personali, notificando le autorità e gli individui in caso di violazioni, e assicurando il diritto degli individui a controllare i propri dati. Da ricordare che ovviamente la non conformità può comportare sanzioni severe e danneggiare di conseguenza la reputazione dell'azienda (Sarker et al., 2020).

Fig. 2.4: *Le 10 minacce cybersecurity più critiche per il 2030.*
Fonte: European Union Agency for Cybersecurity, 2022.

2.4.3 Competenze del personale

Oltre alla protezione tecnica, la formazione del personale è fondamentale se non prioritaria per garantire la sicurezza dei dati aziendali. Gli attacchi di phishing, ingegneria sociale e altre forme di attacco mirano spesso a sfruttare la vulnerabilità umana piuttosto che le debolezze tecniche dei sistemi.

Formare i dipendenti a riconoscere e gestire queste minacce diventa quindi cruciale per prevenire accessi non autorizzati. La consapevolezza del personale sui rischi informatici e l'adozione di buone pratiche, come evitare link sospetti e utilizzare password robuste, contribuiscono a rafforzare la prima linea di difesa dell'azienda. Per questo motivo, le aziende devono investire non solo in tecnologie di protezione, ma anche in programmi di formazione continua, che devono necessariamente essere aggiornati frequentemente per affrontare le minacce in evoluzione e insegnare le nuove tecniche di difesa, e questo senz'altro lo si può vedere come un ulteriore onere che l'azienda deve sostenere, oltre alla problematica in sé. Ad esempio, corsi di sensibilizzazione sulla sicurezza e simulazioni di attacchi di phishing sono strumenti efficaci per allenare i dipendenti a reagire prontamente a situazioni reali (Toppel S. P., 2018)[24].

Un altro elemento essenziale di buona pratica riguarda il reclutamento e la retention dei talenti in ambito di sicurezza informatica. Le competenze specifiche in questo campo infatti sono molto richieste, ma non sempre facili da trovare, soprattutto per via del fatto che ancora non ci sono veri e propri corsi di studio o facoltà universitarie adibiti a tale scopo specifico. Le aziende devono quindi creare ambienti di lavoro stimolanti, che offrano non solo una crescita professionale, ma anche un equilibrio tra lavoro e vita personale, opportunità di aggiornamento continuo e un ambiente che favorisca l'innovazione. Questi aspetti sono fondamentali per mantenere i dipendenti motivati e per attrarre i migliori professionisti, capaci di fronteggiare le nuove sfide della sicurezza informatica (Wagner et al., 2017).

Investire in risorse umane qualificate e formate rappresenta quindi una strategia imprescindibile per ridurre i rischi di violazioni e attacchi informatici, ma risulta una scelta pressoché obbligata anche per quanto riguarda la gestione di sistemi sempre più sofisticati e avanzati che vengono man mano introdotti dall'Industria 4.0, poiché essi richiedono competenze sempre maggiori e sempre più specifiche, soprattutto per quanto riguarda ad esempio l'uso di macchine di stampa 3D, CNC, ed il controllo di flussi massivi di dati, le cui implicazioni sociali saranno discusse in un capitolo dedicato.

[24] Toppel S. P., 2018, Understanding and Preventing Phishing Attacks: A Guide for Organizations. *Journal of Cybersecurity Education, Research and Practice*, vol. 1, n. 4.

Tabella 2.1: *Sintesi dei pro e dei contro degli impatti operativi di I4.0.*

Aspetto	Pro	Contro
Automazione e efficienza operativa	- Aumento della produttività: l'automazione permette operazioni più rapide e precise - Riduzione dei costi operativi: minori errori e riduzione della manodopera necessaria	- Consumo energetico elevato: Le tecnologie avanzate richiedono molta energia per funzionare, con costi aggiuntivi legati alla gestione di queste risorse
Flessibilità e personalizzazione	- Adattamento rapido alle esigenze del mercato: le linee di produzione possono essere riconfigurate in base alle necessità dei clienti - Produzione personalizzata: consente la produzione su misura senza perdere efficienza	- Formazione del personale: La complessità delle nuove tecnologie richiede personale qualificato e aggiornamenti continui
Analisi dei dati e decision making	- Ottimizzazione della produzione: grazie all'analisi dei dati in tempo reale è possibile migliorare l'efficienza produttiva - Decisioni informate: i dati raccolti consentono di prendere decisioni più tempestive e basate su informazioni concrete	- Sicurezza dei dati: con la maggiore interconnessione, aumenta anche il rischio di cyberattacchi e la protezione dei dati diventa una sfida critica
Comunicazione e collaborazione	- Maggiore integrazione: le tecnologie 4.0 favoriscono una collaborazione più fluida tra i diversi reparti aziendali - Accesso ai dati in tempo reale: tutte le funzioni aziendali possono prendere decisioni coordinate rapidamente	- Formazione continua del personale: la gestione di sistemi avanzati richiede personale altamente qualificato e la formazione deve essere costante

3 CAPITOLO 3: GLI IMPATTI ECONOMICO-FINANZIARI

3.1 Premesse

Uno degli aspetti più rilevanti dell'Industria 4.0 è senza dubbio la capacità di generare un vantaggio non solo competitivo ma anche e soprattutto sostenibile per le aziende che abbracciano l'ampia gamma delle tecnologie che porta con sé (Alkaaran et al., 2022)[25]. L'innovazione dei prodotti e dei processi produttivi infatti consente alle imprese di differenziarsi ampiamente nel mercato, offrendo soluzioni personalizzate e ad alto valore aggiunto, e come importante conseguenza dello stabilirsi di cicli di innovazione più veloci e della possibilità di rispondere prontamente alle mutevoli esigenze dei consumatori, la rapidità con cui le aziende possono introdurre nuovi prodotti e servizi è significativamente aumentata (Deloitte United States, 2020)[26].

Va da sé, inoltre, che anche l'efficienza operativa rappresenta un altro pilastro fondamentale del vantaggio competitivo derivante dall'Industria 4.0: basti pensare all'elevatissimo grado di automazione o all'impiego della robotica avanzata, oppure ancora alla possibilità di adottare una manutenzione predittiva, ed ecco che si ottengono diverse soluzioni che permettono di ottimizzare la produzione, riducendo come sappiamo poi gli sprechi ed i costi operativi (Kılıç, 2023)[27]. Soprattutto la modalità di gestione dei dati aziendali e la loro analisi avanzata offrono alle imprese strumenti potenti per prendere decisioni "informate" e migliorare continuamente le proprie performance, consentendo loro di implementare una struttura organizzativa più efficiente e più gestibile (McKinsey & Company, 2020[28]). Inoltre, secondo Deloitte United States, un ulteriore elemento chiave è la capacità di migliorare l'esperienza del cliente. Attraverso, infatti, le varie forme di marketing digitale e i sistemi di gestione delle relazioni con i clienti (CRM) avanzati, le aziende possono personalizzare le interazioni con i clienti, aumentandone così la soddisfazione e la fedeltà, e grazie alla possibilità di fornire supporto tecnico avanzato e di raccogliere feedback in tempo reale esse sono maggiormente in grado di creare un rapporto più stretto e reattivo con i consumatori.

Come abbiamo visto l'Industria 4.0 promuove inoltre un'agilità e una flessibilità senza precedenti nelle operazioni aziendali, con le linee di produzione modulari e la capacità di produrre su richiesta diverse aziende sono in grado di adattarsi rapidamente ai cambiamenti della domanda e di introdurre nuovi prodotti senza significative interruzioni. La supply chain diventa di conseguenza più resiliente grazie alla maggiore visibilità e alla collaborazione facilitata con i fornitori, migliorando l'efficienza e riducendo i rischi operativi (Kılıç, 2023).

Anche la sostenibilità e la responsabilità sociale emergono come fattori distintivi del vantaggio competitivo, dal momento che l'adozione di pratiche di gestione energetica avanzata e l'integrazione di fonti di energia rinnovabile supportano gli obiettivi di sostenibilità ambientale delle imprese.

[25] Alkaraan F., Albitar K., Hussainey K. and Venkatesh V.G., 2022, Corporate transformation toward Industry 4.0 and financial performance: The influence of environmental, social, and governance (ESG*), Technological Forecasting & Social Change*, vol. 157.

[26] Deloitte, 2020, *Industry 4.0: A Global Perspective*

[27] Kılıç C. and Atilla G., 2023, Industry 4.0 and sustainable business models: An intercontinental sample, *Business Strategy and the Environment*, vol. 33, n. 4, pp. 3142-3166.

[28] McKinsey Global Institute, 2020, *The Industry 4.0 Dilemma,* McKinsey & Company.

La trasparenza e la tracciabilità lungo la supply chain, rese possibili da tecnologie come la blockchain, migliorano la reputazione aziendale e attraggono consumatori e investitori attenti alle questioni sociali e ambientali (Hoyer et al., 2020)[29].

In un contesto come questo, dunque, la capacità di un'azienda di sfruttare appieno il potenziale dell'Industria 4.0 diventa un elemento cruciale per mantenere una posizione di leadership nel mercato. Le imprese che riescono ad innovare, migliorare l'efficienza operativa, offrire esperienze cliente superiori, adattarsi rapidamente ai cambiamenti e promuovere la sostenibilità, possono costruire un vantaggio competitivo duraturo e garantire la propria resilienza nel lungo termine.

Di seguito esamineremo nel dettaglio i vari aspetti finanziari dell'Industria 4.0 e il loro impatto sul vantaggio competitivo delle imprese, offrendo un'analisi approfondita delle opportunità e delle sfide che accompagnano questa rivoluzione industriale.

3.2 Impatti Finanziari

3.2.1 Impatto sui bilanci aziendali

Le imprese come si è constatato devono considerare attentamente come questi investimenti influiranno sulla loro situazione finanziaria complessiva, dal momento che l'adozione delle tecnologie dell'Industria 4.0 influisce profondamente i bilanci aziendali, con effetti che possono essere di vario tipo, sia a breve che a lungo termine:

- *Analisi dei flussi di cassa:* l'implementazione delle tecnologie 4.0 richiede un'analisi approfondita dei flussi di cassa, poiché gli alti costi iniziali possono avere un impatto negativo sulla liquidità aziendale nel breve termine; anche se nel lungo periodo, tuttavia, i miglioramenti operativi e l'incremento della produttività possono generare flussi di cassa positivi. Le aziende devono quindi assicurarsi di avere risorse finanziarie sufficienti per coprire i costi di implementazione senza compromettere le operazioni quotidiane, e questo può richiedere l'accesso a linee di credito o l'uso di riserve finanziarie. Inoltre, è essenziale una previsione accurata dei ritorni sugli investimenti (ROI), poiché è necessario per valutare la sostenibilità finanziaria legata all'adozione delle tecnologie dell'Industria 4.0. Questo perché e imprese devono stimare il periodo di recupero degli investimenti e i potenziali ritorni in termini di riduzione dei costi operativi, aumento della produttività e nuove opportunità di ricavi (PwC, 2016)[30].

- *Ritorno sugli investimenti (ROI):* il Return on Investment (ROI), o Ritorno sull'Investimento, è un indicatore finanziario utilizzato per valutare l'efficienza o la redditività di un investimento; dunque, serve a misurare il rendimento di un investimento rispetto al costo iniziale dello stesso. È un parametro fondamentale per le aziende e gli investitori, poiché fornisce una misura diretta del profitto generato dall'investimento in rapporto al capitale impiegato.

[29] Hoyer C., Gunawan I. and Reaiche C.H., Ph.D, 2020, The Implementation of Industry 4.0 – A Systematic Literature Review of the Key Factors, *Systems Research and Behavioral Science*, vol. 37, n. 4, pp. 557-578.

[30] PwC, 2016, *Industry 4.0: Building the Digital Enterprise.* Global Industry 4.0 Survey.

Ne consegue che il calcolo del ROI è cruciale per comprendere i benefici finanziari derivanti dall'adozione delle tecnologie dell'Industria 4.0, poiché se positivo indica il successo dell'investimento, mentre un ROI negativo potrebbe suggerire inefficienze o costi imprevisti. Il ROI può essere calcolato utilizzando diverse metodologie, tra cui l'analisi del valore attuale netto (VAN), il tasso interno di rendimento (TIR) e il periodo di recupero, ed ogni metodo offre una prospettiva diversa sui benefici finanziari, aiutando le aziende a prendere decisioni informate (Hoyer et al., 2020).

Da sottolineare che le imprese devono essere ben consapevoli dei rischi associati alla sottostima dei costi o alla sovrastima dei benefici, soprattutto per quanto concerne un'errata valutazione del ROI, che può portare a investimenti fallimentari e a difficoltà finanziarie (Hoyer et al., 2020).

- *Benefici indiretti:* oltre ai benefici finanziari diretti, l'Industria 4.0 può generare vantaggi intangibili, come il miglioramento della reputazione aziendale, l'incremento della soddisfazione dei clienti e una maggiore capacità di innovazione. Questi fattori, pur non essendo immediatamente quantificabili, contribuiscono a lungo termine alla creazione di valore per l'azienda.

Per quanto riguarda il concetto di immagine delle imprese, quelle che talvolta adottano tecnologie avanzate sono percepite come innovative e all'avanguardia, e questo può attirare l'attenzione positiva di clienti, partner commerciali e investitori, rafforzando la fiducia nel brand. Una reputazione migliorata e l'immagine di un'azienda innovativa aumentano il valore del marchio (brand equity), che può tradursi quindi in una maggiore capacità di stabilire prezzi premium o di attrarre investimenti.

In più, un'impresa che investe in tecnologie 4.0 è più adattabile ai cambiamenti di mercato e più resiliente di fronte a crisi o interruzioni della catena di fornitura, garantendo una continuità operativa che protegge e accresce il proprio valore (Alkaaran et al., 2022). Le tecnologie 4.0 inoltre consentono spesso di operare come sappiamo in modo più sostenibile, riducendo l'impatto ambientale attraverso una maggiore efficienza energetica, la riduzione degli sprechi e l'uso di materiali più sostenibili. Questo può migliorare la percezione dell'azienda come responsabile dal punto di vista sociale e ambientale, un aspetto sempre più apprezzato dai consumatori e dagli investitori (Ciliberto et al., 2021)[31]. Inoltre, anche la capacità di monitorare in tempo reale i processi produttivi e di garantire standard elevati di qualità può migliorare la reputazione dell'azienda per l'affidabilità e la qualità dei suoi prodotti o servizi.

Dato che ovviamente il rapporto con il cliente è fondamentale, utilizzando varie tecnologie 4.0 come l'additive manufacturing e l'analisi dei Big Data, le aziende possono offrire prodotti personalizzati su larga scala, ed è proprio questo livello di personalizzazione che accresce la soddisfazione dei clienti, poiché i prodotti e servizi sono più vicini alle loro esigenze specifiche. Anche l'automazione dei processi e l'ottimizzazione della catena di approvvigionamento, resi possibili dalle tecnologie 4.0, che permettono alle aziende di ridurre i tempi di produzione e consegna, aumentano positivamente la percezione della clientela, così come l'uso di sistemi di monitoraggio avanzati e dell'intelligenza artificiale, che possono rilevare e correggere difetti di produzione in tempo reale,

[31] Ciliberto C., Szopik-Depczy_nska K., Tarczy_nska-Łuniewska M., Ruggieri A. and Ioppolo G., 2021, Enabling the Circular Economy transition: a sustainable lean manufacturing recipe for Industry 4.0, *Business Strategy and the Environment*, vol. 30, n. 7, pp. 3255-3272.

garantendo che i clienti ricevano prodotti di alta qualità, comporta una fidelizzazione maggiore, oltre a diminuire i resi (Brettel et al., 2014)[32].

3.2.2 Riduzione dei costi di breve e lungo termine

Anche se l'adozione delle tecnologie proprio dell'Industria 4.0 comporta inizialmente e continuamente diversi oneri finanziari (di cui parleremo più tardi in questo capitolo), al tempo stesso offre un'opportunità straordinaria per la riduzione di quelli che sono i costi operativi delle imprese, grazie al grado elevato di automazione e all'ottimizzazione che tali tecnologie portano ai vari organi aziendali, soprattutto per quanto riguarda molti degli aspetti dei processi produttivi (Alkaaran et al., 2022). Questa rivoluzione industriale, infatti, non solo riduce i costi immediati ma anche quelli a lungo termine, migliorando così la sostenibilità e la competitività delle aziende. Di seguito verranno esaminati i diversi modi in cui si può concretizzare questa riduzione dei costi.

- *Robotica e automazione*: anzitutto, uno degli elementi chiave della riduzione dei costi operativi è senza dubbio l'automazione avanzata. Con l'introduzione della robotica, abbiamo visto come le aziende possono sostituire gran parte della manodopera umana in compiti ripetitivi e spesso pericolosi. Questo non solo riduce la dipendenza dalla forza lavoro umana, ma abbassa notevolmente i costi legati a salari e potenziali incidenti sul lavoro, poiché i robot, grazie alla loro precisione e velocità, sono in grado di migliorare l'efficienza operativa, riducendo al minimo gli errori e aumentando la produttività (McKinsey & Company, 2021)[33]. Un altro aspetto dell'automazione è rappresentato poi dai sistemi di controllo e supervisione come SCADA e PLC (Programmable Logic Controller), in quanto costituiscono due dei pilastri più importanti dell'automazione industriale e, pur avendo funzioni diverse, spesso lavorano insieme per monitorare, controllare e ottimizzare processi industriali complessi. Ricordiamo che SCADA è un sistema utilizzato nelle industrie per monitorare e controllare impianti e infrastrutture, e lo si può immaginare come un grande supervisore che raccoglie dati in tempo reale dai vari macchinari e sensori distribuiti in un impianto. Grazie a SCADA, non solo è possibile vedere cosa succede in ogni angolo dell'impianto, ma anche intervenire direttamente se qualcosa non sorgono vari problemi di sorta. Questo sistema memorizza anche i dati storici, il che aiuta a fare analisi e ottimizzare le operazioni nel tempo (Alkaaran et al., 2022). Passando al PLC, descritto sempre da Alkaaran et al. 2022, questo dispositivo è un po' come il cervello di un macchinario specifico, ovvero un computer programmabile progettato per controllare processi industriali. Robusto e affidabile, il PLC è capace di operare in ambienti industriali difficili e svolge compiti che richiedono precisione e costanza. Se infatti un macchinario deve essere acceso o spento a intervalli specifici, oppure deve svolgere una sequenza di operazioni, è il PLC a gestirlo. Inoltre, può anche monitorare le condizioni operative e generare allarmi se qualcosa non funziona come dovrebbe.

[32] Brettel M., Friederichsen N., Keller M. and Rosenberg M., 2014, How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*, vol. 8, n. 1.

[33] McKinsey Global Institute, 2021, *The Next Normal in Manufacturing: What Industry 4.0 Means for the Future of Production,* McKinsey & Company.

SCADA e PLC riducono dunque i costi operativi principalmente attraverso l'ottimizzazione e l'automazione: il PLC automatizza processi e macchinari, riducendo la necessità di intervento manuale, aumentando l'efficienza produttiva e diminuendo errori e tempi morti; mentre SCADA, monitorando e supervisionando in tempo reale l'intero impianto, consente di individuare rapidamente problemi e inefficienze, riducendo i tempi di fermo e i costi di manutenzione. Inoltre, l'analisi dei dati storici raccolti da SCADA aiuta a migliorare le operazioni nel tempo, rendendo i processi sempre più efficienti e cost-effective.

- *Manutenzione predittiva:* un altro pilastro fondamentale dell'Industria 4.0 è la manutenzione predittiva, resa possibile dall'Internet of Things e dall'analisi dei Big Data. Come abbiamo già avuto modo di apprendere, i sensori IoT monitorano costantemente lo stato delle attrezzature, raccogliendo dati in tempo reale sulle loro condizioni operative, i quali vengono poi analizzati per prevedere possibili guasti, permettendo alle aziende di programmare interventi di manutenzione solo quando necessario. Un tale approccio riduce i costi legati alla manutenzione non programmata e previene costosi fermi macchina, migliorando la durata e l'affidabilità delle attrezzature (Deloitte, 2020). L'analisi dei Big Data invece consente di sviluppare modelli predittivi che identificano pattern specifici che possono precedere un guasto, migliorando di conseguenza l'affidabilità degli impianti e riducendo al contempo la frequenza e la gravità degli interventi di manutenzione. Inoltre, la manutenzione predittiva ottimizza l'uso dei ricambi e delle risorse, riducendo i costi legati a riparazioni urgenti e a scorte di magazzino eccessive (Alkaaran et al., 2022).

- *Ottimizzazione energetica:* l'Industria 4.0 favorisce anche una significativa ottimizzazione energetica attraverso l'uso particolari sistemi, noti come Sistemi di Gestione dell'Energia (EMS), e macchinari ad alta efficienza energetica. Questi EMS nello specifico monitorano i consumi energetici in tempo reale, permettendo alle aziende di identificare sprechi e inefficienze: grazie a questi sistemi, dunque, è possibile implementare strategie di risparmio energetico che ottimizzano i processi produttivi e che favoriscono l'uso di fonti energetiche rinnovabili, riducendo così i costi energetici complessivi. Per quanto riguarda invece l'adozione di macchinari ad alta efficienza energetica, si può affermare tale pratica contribuisce ulteriormente alla riduzione dei costi operativi a lungo termine, dal momento che questi macchinari sono progettati per consumare meno energia senza però compromettere le prestazioni produttive. Inoltre, tecnologie come il recupero di energia permettono di riutilizzare l'energia generata durante i processi produttivi, come il calore di scarto, migliorando ulteriormente l'efficienza energetica e riducendo così i costi associati (Gartner, 2022)[34].

- *Digitalizzazione dei processi:* la digitalizzazione gioca un ruolo cruciale nella riduzione dei costi operativi attraverso strumenti come i Digital Twin e i sistemi ERP. Infatti, grazie alla capacità dei primi di testare e perfezionare le operazioni attraverso la simulazione di progettazione e produzione di componenti, macchinari e attrezzature, vengono ridotti notevolmente i tempi di inattività e i rischi associati ad errori operativi, portando a una significativa riduzione dei costi.

[34] Gartner, 2022, *Top Strategic Technology Trends for 2022: Industry 4.0.*

I sistemi ERP integrati, d'altra parte, migliorano la gestione delle risorse aziendali, ottimizzando i livelli di inventario e riducendo i costi di stoccaggio, e la digitalizzazione della supply chain che portano permette di tracciare e gestire le scorte in tempo reale, diminuendo gli sprechi e migliorando l'efficienza operativa (Deloitte, 2020**)**.

- *Formazione e competenza del personale:* sappiamo che un ulteriore vantaggio dell'Industria 4.0 è rappresentato dalla formazione continua e dalla collaborazione uomo-macchina. In questo contesto, soprattutto l'uso di tecnologie come l'e-learning la realtà aumentata sta rivoluzionando il modo in cui il personale viene formato e aggiornato. Questi strumenti digitali riducono infatti i costi legati alla formazione tradizionale, permettendo ai dipendenti di acquisire nuove competenze in modo più efficiente e senza interrompere le operazioni produttive: la realtà virtuale e aumentata, ad esempio, consente come abbiamo visto di creare simulazioni realistiche in cui i dipendenti possono imparare a utilizzare nuove attrezzature o familiarizzare con nuovi processi in un ambiente controllato e sicuro. Questo approccio riduce i rischi associati alla formazione sul campo e diminuisce i costi legati a eventuali errori durante l'apprendimento (Alkaaran et al., 2022). Inoltre, non dimentichiamo che la collaborazione tra uomo e macchina viene ottimizzata ancor di più grazie all'introduzione dei cobots, che lavorano fianco a fianco con gli esseri umani ed eseguono compiti che richiedono precisione e ripetitività, mentre i lavoratori umani si concentrano su attività che richiedono creatività e giudizio. Un loro grande vantaggio è che i cobots non richiedono significative modifiche infrastrutturali e possono essere integrati nei processi esistenti senza interruzioni, migliorando la produttività complessiva senza aumentare i costi operativi in modo significativo, come evidenziato da McKinsey & Company, 2021.

3.2.3 Finanziamenti ed incentivi

Nonostante le aziende debbano in ogni caso far fronte agli elevati costi associati all'adozione dell'Industria 4.0, possono tuttavia ricorrere a diverse fonti di finanziamento e a una serie di incentivi disponibili, sia a livello nazionale che internazionale, e tali strumenti sono fondamentali al fine di rendere sostenibili gli investimenti necessari e di ridurre i rischi finanziari associati. In particolare, esse possono accedere a finanziamenti sia pubblici che privati, poiché molti governi nazionali e locali offrono sovvenzioni specifiche per progetti di digitalizzazione e innovazione. Questi fondi, che non devono peraltro essere restituiti, possono arrivare a coprire una parte significativa dei costi di implementazione (Kılıç, 2023). Buona parte delle sovvenzioni nello specifico sono spesso destinate a settori strategici o a piccole e medie imprese (PMI), le quali spesso dispongono di risorse limitate da investire in nuove tecnologie. Esistono poi anche programmi a livello regionale che forniscono finanziamenti per migliorare la competitività delle imprese locali attraverso l'adozione delle tecnologie avanzate, che sono talvolta gestiti da agenzie di sviluppo propriamente regionale e possono includere sia finanziamenti diretti che supporto tecnico e consulenze.

A livello europeo, l'Unione Europea offre vari programmi di finanziamento, come l'Horizon Europe, il programma quadro per la ricerca e l'innovazione, e il Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR), che possono fornire accesso a finanziamenti significativi, spesso in collaborazione con altre aziende e istituti di ricerca; questo perché sono molto frequentati gli hub di innovazione digitale (DIH), ossia centri che forniscono supporto tecnico, formazione e consulenza alle PMI per l'adozione delle tecnologie digitali, i quali appunto sono molte volte coordinate con università e centri di ricerca.

Inoltre, i governi e le agenzie di sviluppo economico spesso offrono anche consulenze gratuite o sovvenzionate per aiutare le imprese a pianificare e implementare progetti di digitalizzazione. Tali programmi di formazione e aggiornamento delle competenze, finanziati o cofinanziati da enti pubblici, possono aiutare a colmare il divario di competenze necessario per l'adozione delle tecnologie dell'Industria 4.0 (OECD, 2017)[35].

Ora, per quanto concerne imprese innovative come le start-up e le PMI tecnologiche, una fonte importante di finanziamento può essere rappresentata da quelli che sono gli investitori di venture capital e private equity. Questi investitori forniscono capitali in cambio di partecipazioni azionarie, e permettono dunque alle imprese di ottenere i fondi necessari senza dover contrarre debiti. Tuttavia, il coinvolgimento di questi investitori implica la condivisione del controllo dell'azienda e una pressione costante per generare ritorni elevati. Altrimenti, un'altra valida opzione possono essere le istituzioni finanziarie, dato che esse offrono prestiti a tassi competitivi per finanziare l'acquisto di nuove tecnologie; oppure, ancora, un'ulteriore possibilità per le aziende che preferiscono non impegnare capitale a lungo termine la si può trovare nel leasing. Attraverso il leasing, infatti, le imprese possono utilizzare nuove attrezzature dovendo pagare solo una rata periodica, senza dover sostenere l'intero costo iniziale (Hoyer et al., 2020). Da tenere in considerazione sono senza dubbio inoltre gli incentivi fiscali, strumenti cruciali per ridurre l'onere fiscale delle imprese che investono nell'Industria 4.0, incentivandole a modernizzare e innovare. Molti paesi offrono infatti crediti d'imposta per le spese in ricerca e sviluppo, che possono ridurre significativamente l'imposta sul reddito delle imprese, e sono quindi progettati per incentivare le imprese a investire in innovazione e a sviluppare nuove tecnologie, prodotti e processi. In aggiunta, anche la possibilità di adottare super e iper-ammortamenti permette alle aziende di dedurre una percentuale maggiore dei costi delle nuove tecnologie, accelerando l'ammortamento fiscale e riducendo l'imposta sul reddito. Nello specifico il super ammortamento si applica generalmente ai beni strumentali tradizionali, mentre l'iper-ammortamento è riservato a beni tecnologici avanzati, strettamente legati proprio all'Industria 4.0 (OECD, 2017).

Oltre a questo, come riportato da Alkaaran et al. 2022, le imprese possono beneficiare di diverse detrazioni fiscali, soprattutto per quanto concerne gli investimenti in beni strumentali avanzati, software e formazione del personale, i quali diminuiscono il costo effettivo di tali investimenti, rendendo più accessibile l'adozione delle tecnologie avanzate, e in aggiunta, il supporto governativo e i programmi di assistenza comprendono anche servizi di consulenza e formazione.

3.3 Impatti economici

3.3.1 Aumento della produttività

L'Industria 4.0 rappresenta come sappiamo un'opportunità fondamentale per le imprese per ridefinire i propri processi produttivi e i modelli di business, ma nel momento in cui si affronta il tema della trasformazione digitale, risulta complesso e spesso incerto prevedere con precisione gli effetti economici che essa potrà avere entro un determinato lasso di tempo.

[35] OECD, 2017, *The Next Production Revolution: Implications for Governments and Business,* OECD Publishing.

Tuttavia, malgrado ciò, è possibile anticipare l'impatto che avrà su altri aspetti dell'impresa, come quelli produttivi, organizzativi e strategici (Alkaaran et al., 2022). Questo perché il cambiamento digitale non è un processo casuale, ma richiede una strategia ben definita, progettata e delineata dai manager dell'azienda, i quali devono valutare le tecnologie che siano più appropriate per il loro business, identificare i mercati più profittevoli, migliorare l'efficienza dei processi e delle risorse umane, e soprattutto, anticipare gli effetti di tali cambiamenti per realizzare soluzioni più efficaci. Questo processo si basa sulla trasformazione del know-how aziendale e sull'utilizzo dei dati, che, attraverso una raccolta continua e sistematica, diventano fondamentali se si intende guidare le decisioni strategiche e operative dell'impresa. È essenziale che la trasformazione dei dati in asset aziendale sia vista come un investimento piuttosto che come un semplice costo, questo perché serve per garantire che la digitalizzazione porti a un'efficienza reale e sostenibile, come riportato da Kılıç, 2023. La raccolta e l'analisi dei Big Data sono alla base di questa ottimizzazione, permettendo alle aziende di raccogliere una grande quantità di dati in tempo reale da varie fonti, come sensori di produzione, macchinari e sistemi gestionali. L'analisi di questi dati consente di individuare inefficienze e colli di bottiglia che rallentano la produzione, permettendo decisioni più informate e soluzioni mirate.

Un elemento chiave di questo processo è la flessibilità dei processi aziendali, che rappresenta uno dei principali vantaggi derivanti dalla digitalizzazione. Tuttavia, per ottenere risultati significativi, la trasformazione digitale deve essere avviata dall'interno dell'azienda, attraverso una revisione e un ridisegno delle sue strutture e dinamiche interne. L'adozione di un approccio digitale richiede una gestione più rapida e continua delle informazioni, rendendo necessario un cambiamento nei processi aziendali rispetto ai metodi tradizionali, il che spesso implica il bisogno di coinvolgere figure manageriali esterne, in grado di introdurre innovazioni sia nei processi operativi sia nella cultura aziendale (PwC, 2016).

In questo contesto, anche la qualità dei prodotti e la minimizzazione degli scarti diventano essenziali. I sistemi di controllo qualità automatizzato, come quelli basati su visione artificiale, permettono un'ispezione continua e precisa dei prodotti, riducendo al minimo i difetti e garantendo un alto livello di qualità. Sensori avanzati, integrati nei macchinari, monitorano in tempo reale eventuali anomalie, consentendo interventi immediati per correggere i problemi, riducendo così gli scarti e migliorando la qualità complessiva della produzione (Gartner, 2022). Per quanto riguarda il punto di vista produttivo, vi sono alcuni aspetti portati dall'Industria 4.0 che concorrono a migliorarlo in modo significativo, ossia:

- *Automazione ed efficienza:* l'automazione permette alle aziende di aumentare significativamente la propria produttività tramite l'integrazione di robot industriali e sistemi automatizzati nei processi produttivi. Grazie a queste tecnologie avanzate, si ottiene una riduzione significativa dei tempi di ciclo, un miglioramento della qualità e una diminuzione degli errori legati al fattore umano. L'integrazione di tecnologie come l'Internet of Things e i sensori intelligenti consente un monitoraggio costante delle condizioni operative, correggendo immediatamente eventuali deviazioni dai parametri ottimali. L'automazione, dunque, non si limita a sostituire il lavoro umano, bensì lo ottimizza, utilizzando le competenze umane per compiti più complessi e di alto valore.

- *Progettazione e sviluppo agile:* l'Industria 4.0 permette alle aziende di adottare approcci agili nello sviluppo dei prodotti, accelerando i cicli di progettazione e migliorando la capacità di rispondere alle esigenze del mercato. L'uso della stampa 3D e di altre tecnologie di produzione additiva consente alle aziende di creare rapidamente prototipi, testare nuove idee e apportare modifiche senza la necessità di strumenti costosi. Inoltre, la digitalizzazione dei processi di progettazione permette di integrare feedback in tempo reale durante tutte le fasi dello sviluppo del prodotto, accelerando l'innovazione e garantendo che i prodotti finali rispondano meglio alle esigenze dei clienti. Anche la manifattura additiva, o stampa 3D, contribuisce a questa riduzione dei tempi, permettendo la produzione rapida di prototipi e componenti, e riducendo i tempi di sviluppo e produzione.

- *Collaborazione e integrazione:* un ulteriore aspetto vantaggioso della trasformazione digitale è la capacità di creare relazioni efficaci che facilitano la trasmissione di conoscenze e competenze all'interno dell'azienda, promuovendo così una maggiore integrazione nei flussi di lavoro e favorendo interconnessioni più strette e sinergie tra le diverse funzioni aziendali. Le piattaforme digitali giocano un ruolo fondamentale in questo contesto, poiché permettono una maggiore collaborazione tra team e dipartimenti, sia all'interno che all'esterno dell'azienda, come evidenziato più volte da Boston Consulting Group, 2021[36]. Secondo lo stesso studio, la condivisione delle conoscenze e l'accesso a informazioni in tempo reale migliorano infatti la coerenza e la qualità dei prodotti, riducendo i tempi di sviluppo e aumentando l'efficienza complessiva. Oltre a questo, la digitalizzazione dei processi gestionali aumenta la trasparenza e la tracciabilità, migliorando la reattività dell'azienda alle sfide del mercato.
Le piattaforme di collaborazione digitale quindi, oltre ad agevolare notevolmente la comunicazione tra i team e dipartimenti, accelerano in maniera significativa i processi decisionali e migliorano di conseguenza l'efficienza operativa, soprattutto perchè consentono uno sviluppo di nuovi prodotti molto più rapido, rendendo al contempo l'integrazione dei processi produttivi maggiormente efficace.

3.3.2 Miglioramento della qualità dei prodotti

L'Industria 4.0 ha un impatto significativo sulla qualità dei prodotti, grazie all'integrazione di tecnologie avanzate che migliorano il controllo, aumentano la personalizzazione e riducono gli scarti. L'adozione di queste tecnologie consente alle aziende di garantire standard di qualità più elevati, soddisfare meglio le esigenze dei clienti e mantenere un vantaggio competitivo duraturo. In primis il controllo qualità automatizzato è una componente chiave per migliorare la qualità dei prodotti, e viene eseguito tramite i sistemi di visione artificiale, utilizzando telecamere ad alta risoluzione e algoritmi avanzati, permettendo così di effettuare ispezioni visive automatizzate durante il processo produttivo. Nello specifico questi sistemi rilevano difetti, variazioni di colore, imperfezioni superficiali e altre anomalie con una precisione superiore a quella dell'occhio umano. Inoltre, il controllo in tempo reale consente di identificare e correggere immediatamente i problemi, evitando interruzioni nella linea di produzione e garantendo soprattutto una qualità costante.

[36] Boston Consulting Group, 2021, *How Industry 4.0 Is Transforming Business.*

I sensori avanzati integrati nei macchinari svolgono un ruolo cruciale nel monitoraggio continuo delle condizioni operative e delle caratteristiche del prodotto, in quanto essi misurano variabili critiche come dimensioni, peso, temperatura e pressione, fornendo un feedback immediato ai sistemi di controllo. Questo feedback è molto importante, perché permette poi di effettuare correzioni istantanee, assicurando che i prodotti rispettino gli standard di qualità e riducendo la possibilità di difetti (Alkaaran et al., 2022).

Altro aspetto che deriva dall'adozione delle tecnologie Smart Factory risiede nella personalizzazione di massa, e costituisce un altro vantaggio chiave dell'Industria 4.0, dato che consente alle aziende di rispondere alle specifiche esigenze dei clienti senza compromettere l'efficienza produttiva. Grazie, inoltre, alle linee di produzione flessibili si è in grado di passare rapidamente da un prodotto all'altro, potendosi adattare alle richieste dei clienti e migliorare così la qualità percepita dei prodotti. Questa flessibilità produttiva è supportata da tecnologie avanzate che consentono una configurazione rapida e un adattamento efficiente. In questo contesto come sappiamo la manifattura additiva è il perno portante, soprattutto perchè permette la prototipazione rapida, facilitando quindi iterazioni e miglioramenti nel design del prodotto prima della produzione su larga scala. Inoltre, la capacità di produrre componenti personalizzati su richiesta senza costi aggiuntivi significativi migliora la qualità dei prodotti finiti, assicurando che siano conformi alle esigenze specifiche dei clienti (Deloitte, 2020).

Da un punto vista maggiormente sostenibile, l'ottimizzazione dei processi produttivi è essenziale anche al fine di ridurre gli scarti e migliorare la qualità dei prodotti. L'analisi avanzata dei Big Data raccolti durante la produzione, infatti, permette di identificare inefficienze e sprechi, ottimizzando i processi e riducendo gli scarti. Questo approccio è supportato dalla manutenzione predittiva, che riduce i tempi di inattività non programmati e i guasti delle macchine, prevenendo difetti nei prodotti e minimizzando gli sprechi. Tuttavia, non solo l'analisi dei dati rappresenta un'importante innovazione, dal momento che un'altra tecnologia fondamentale nella riduzione degli scarti è costituita dai Digital Twins, visto che permettono di simulare e ottimizzare i processi produttivi prima di implementare modifiche nel mondo reale, riducendo il rischio di errori e difetti. Il monitoraggio continuo attraverso i gemelli digitali consente un'ottimizzazione dinamica, incrementando la qualità del prodotto e abbassando gli sprechi. Oltre ai software di simulazione anche gli strumenti di progettazione assistita da computer (CAD) permettono di sviluppare prodotti di alta qualità fin dalle prime fasi del progetto. Inoltre, le piattaforme di collaborazione digitale facilitano la comunicazione tra i team di progettazione, ingegneria, produzione e qualità, migliorando l'integrazione e l'innovazione (Schwab, 2016)[37].

Non dimentichiamo che anche l'IA gioca un ruolo fondamentale in questo contesto, dato che rappresenta il fulcro dell'ottimizzazione del design e del riconoscimento dei pattern nei dati di produzione. Difatti, gli algoritmi di IA possono analizzare grandi quantità di dati per identificare opportunità di miglioramento e ottimizzazione del design dei prodotti, ed in più l'IA è in grado di riconoscere pattern che indicano potenziali difetti, permettendo interventi preventivi e migliorando la qualità del prodotto.

[37] Schwab K., 2016, *The Fourth Industrial Revolution.* Crow Publishing.

Al di là di tutto questo occorre considerare secondo Deloitte, 2020 la tracciabilità e la trasparenza che caratterizzano i vari processi produttivi, specie se avanzati, ed esse vengono garantite dall'uso di tecnologie come la blockchain e i sistemi ERP integrati. In particolare, la prima viene utilizzata per tracciare i prodotti lungo la catena di fornitura e fornisce un registro immutabile e trasparente di ogni fase del processo produttivo. Questo registro permette poi di identificare rapidamente le cause dei difetti e di intervenire tempestivamente, migliorando la qualità complessiva dei prodotti. I sistemi ERP integrati migliorano invece la coordinazione tra i diversi reparti aziendali e permettono un controllo più accurato dei processi produttivi. Specificamente, i moduli di gestione della qualità all'interno degli ERP consentono di monitorare e gestire gli standard di qualità lungo tutta la catena di fornitura, garantendo la conformità alle normative e agli standard aziendali, e soprattutto di mantenere un vantaggio competitivo nel lungo termine.

3.3.3 Creazione di nuove opportunità di mercato

Creare un modello di *business* differente rispetto a quello dei *competitors* è oramai un obiettivo primario per le aziende nella nuova era 4.0, visto che essa sta portando svilupparne una nuova concezione, con lo scopo di garantire un vero e proprio vantaggio competitivo. Tuttavia, tale modello dovrà continuare a sfruttare le caratteristiche distintive dell'organizzazione, utilizzando nel migliore dei modi tutte le informazioni disponibili sia riguardanti la stessa impresa che quelle esterne, assicurando inoltre all'utente finale valore aggiunto rispetto al passato. Grazie alle tecnologie della Smart Factory, le imprese possono ridefinire i loro modelli di business, sviluppare nuovi prodotti e servizi, e accedere a nuove opportunità di mercato, il tutto con un approccio più sostenibile e responsabile (Ciliberto et al., 2021).

È sicuramente noto che uno degli aspetti più rivoluzionari dell'Industria 4.0 sia la capacità di sviluppare prodotti intelligenti e connessi, e questo è dovuto principalmente grazie all'integrazione dell'IoT. In questo modo non solo tali prodotti rispondono alle esigenze dei clienti in maniera più efficace, ma possono anche creare dei veri e propri nuovi mercati (Schwab, 2016). Pensiamo, ad esempio, ai dispositivi che possono comunicare tra loro e con gli utenti, offrendo funzionalità avanzate come il monitoraggio remoto e la manutenzione predittiva. Queste innovazioni non solo aggiungono valore per i clienti, ma offrono anche alle aziende nuove fonti di ricavo, ampliando le possibilità di business. Inoltre, le tecnologie di produzione digitale permettono alle aziende di offrire prodotti personalizzati su larga scala, adottando il concetto della customizzazione di massa.

Ciò significa che le imprese possono soddisfare le esigenze specifiche di ogni cliente senza compromettere l'efficienza della produzione di massa, il che implica un aumento della soddisfazione del cliente e la possibilità concreta e consistente per le aziende di differenziarsi dai concorrenti in un mercato sempre più competitivo (Alkaaran et al., 2022).

L'Industria 4.0 non si limita inoltre a migliorare l'efficienza operativa; essa apre la strada a nuovi modelli di business che possono trasformare interi settori. Un elemento cruciale che si sta consolidando nelle aziende è il concetto di "servitizzazione", (schematizzata in figura 3.1) che non prevede più la semplice commercializzazione dei prodotti, ma una combinazione di questi ultimi con una gamma di servizi aggiuntivi, offrendo dunque servizi completi che includono manutenzione,

aggiornamenti, e supporto tecnico continuo. Questo approccio non solo genera ricavi ricorrenti, ma rafforza anche la relazione con i clienti, migliorando la loro fedeltà e riducendo la volatilità delle entrate.
Questo implica che il vero fattore distintivo risiederà nella qualità e nell'unicità del servizio proposto, requisiti fondamentali nel processo di fidelizzazione del cliente in un contesto in continua evoluzione. Infatti, i prodotti offerti singolarmente saranno sempre più percepiti dal cliente come delle commodity, con margini di profitto molto ridotti (Kohtamäki et al., 2020)[38]. Un esempio emblematico è rappresentato dalla casa automobilistica britannica Rolls Royce, che, nonostante sia immediatamente associata alle celebri automobili di lusso, si è affermata come leader nel settore dei motori per aerei, rivoluzionando il suo modello di business. A partire dagli anni 2000, ha infatti iniziato ad adottare il cosiddetto modello "pay-per-use" per i motori aeronautici. Si tratta di un servizio di noleggio molto flessibile, privo di vincoli, in cui l'utente finale non è obbligato ad acquistare le turbine per i velivoli, ma può utilizzarle pagando un canone annuale in base all'effettivo utilizzo, senza trasferire la proprietà e includendo anche un servizio di manutenzione. La strategia di vendita è quindi cambiata in modo significativo, poiché ora viene venduto un servizio (ore di volo/motore) anziché un prodotto.
La produzione è quindi orientata al servizio, raggiungendo un'offerta unica che non sarebbe possibile ottenere limitandosi esclusivamente alle tecnologie, poiché queste sono riproducibili (Kohtamäki et al., 2020).

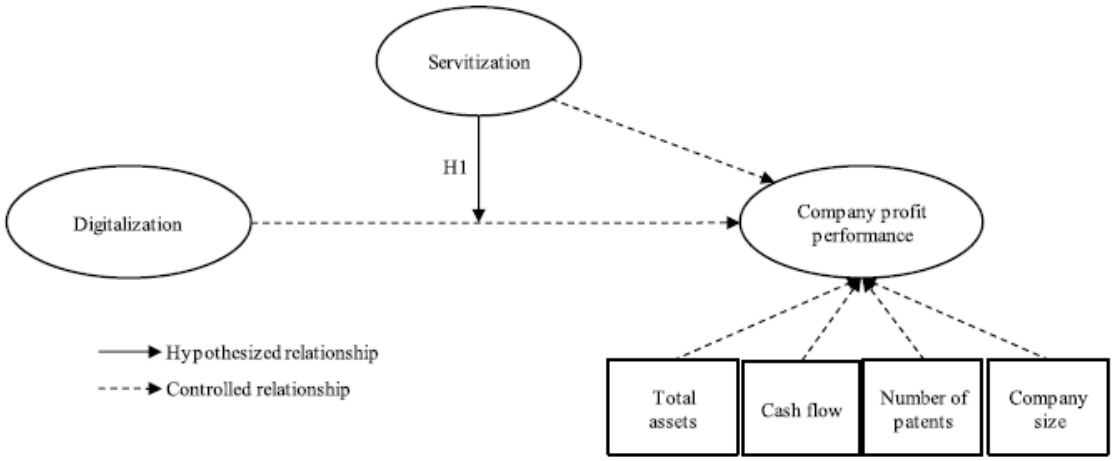

Fig. 3.1: *La servitizzazione e il suo rapporto con la trasformazione digitale. Fonte: Kohtamäki et al., 2020.*

L'Industria 4.0 facilita inoltre come sappiamo l'adozione di pratiche di economia circolare: in questo modello, i materiali e i prodotti vengono riciclati, riutilizzati e rigenerati in cicli continui, mentre le varie tecnologie digitali permettono un monitoraggio accurato e una gestione efficiente delle risorse, riducendo gli sprechi e creando nuove opportunità di mercato per i materiali riciclati e i prodotti rigenerati. Questo approccio non solo contribuisce a una maggiore sostenibilità ambientale, ma può anche ridurre i costi operativi e aprire nuovi flussi di entrate per le aziende (Ciliberto et al., 2021).

[38] Kohtamäki M., Paridaa V., Patelc P.C. and Gebauerd H., 2020, The relationship between digitalization and servitization: The role of servitization in capturing the financial potential of digitalization, *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 151.

È importante rimarcare che anche per quanto concerne la sostenibilità e responsabilità sociale l'Industria 4.0 gioca un ruolo assolutamente cruciale, dal momento che essa le integra nei modelli business delle imprese, perché da un lato le tecnologie avanzate permettono di monitorare e ridurre le emissioni di CO2 lungo tutta la supply chain, migliorando così l'impatto ambientale, e dall'altro l'integrazione di fonti di energia rinnovabile nei processi produttivi non solo riduce la dipendenza dai combustibili fossili, ma rafforza anche la sostenibilità aziendale. Le iniziative di responsabilità sociale d'impresa (CSR) diventano così una parte fondamentale del modello di business nell'era dell'Industria 4.0. Non solo, ma le aziende possono sviluppare inoltre programmi che promuovono pratiche sostenibili e supportano le comunità locali, migliorando la loro reputazione e la fedeltà dei clienti (Hoyer et al., 2020). Da tutte queste considerazioni emerge sempre più il fatto che l'Industria 4.0 non è solo una questione di tecnologie avanzate, ma rappresenta un cambiamento profondo nel modo in cui le aziende operano, innovano e si relazionano con il mondo. Le imprese che abbracciano questa trasformazione non solo ottengono vantaggi competitivi significativi, ma contribuiscono anche a un futuro più sostenibile e responsabile.

3.3.4 Competitività e globalizzazione

L'Industria 4.0 rappresenta una leva strategica fondamentale per le aziende, offrendo loro la possibilità di ottenere un vantaggio competitivo significativo sfruttando vari suoi fattori. Questo vantaggio si manifesta sostanzialmente in una posizione di leadership sul mercato, un miglioramento della redditività e una maggiore resilienza, sia a livello nazionale che globale, trasformando i mercati e ridefinendo le dinamiche competitive (Kılıç, 2023). L'adozione delle tecnologie avanzate, come la stampa 3D, l'automazione e la robotica, permette come già precedentemente discusso alle aziende di ridurre i costi operativi, migliorare l'efficienza e la qualità, e rispondere in modo più rapido e mirato alle esigenze del mercato. Anche la produzione personalizzata su larga scala, la prototipazione rapida e l'integrazione di feedback in tempo reale svolgono una parte fondamentale, perchè accelerano il ciclo di sviluppo dei prodotti, consentendo alle aziende di lanciare nuove soluzioni con maggiore velocità rispetto alla concorrenza (PwC, 2016). In particolare, tramite l'uso di sistemi di gestione delle relazioni con i clienti (CRM) avanzati e delle tecnologie di marketing digitale, le aziende sono in grado di offrire esperienze su misura, aumentando la soddisfazione e la fidelizzazione del cliente. Un altro vantaggio lo possiamo riscontrare nelle interazioni omnicanale, che integrano diversi canali di comunicazione come online, mobili e social media, che migliorano l'engagement e l'esperienza della clientela. Inoltre, il supporto tecnico avanzato, attraverso assistenti virtuali e chatbot, riduce i tempi di risposta e migliora l'efficienza del servizio ad essa offerto.

Questi aspetti non solo migliorano la competitività, ma permettono anche alle aziende di offrire prodotti unici e altamente personalizzati, rispondendo alle esigenze specifiche dei clienti e soprattutto creando nuove opportunità di mercato (Alkaaran et al., 2022). Inoltre, Alkaraan et al. (2022) evidenziano come l'Industria 4.0 faciliti l'accesso ai mercati globali attraverso piattaforme di e-commerce, sistemi di gestione della supply chain digitali e strumenti di marketing digitale, consentendo alle aziende di raggiungere nuovi clienti in tutto il mondo e diversificare le loro fonti di ricavo.

Le tecnologie digitali riducono le barriere geografiche e permettono alle imprese di operare a livello globale, adattandosi alle diverse normative e contesti culturali, e gestendo le complessità di un mercato sempre più interconnesso.

Riprendendo anche il concetto della servitizzazione, si sottolinea ancora una volta la sua importanza in tale contesto, in quanto grazie ad essa le imprese hanno la possibilità di trasformare la loro offerta da semplice vendita di prodotti a fornitura di servizi completi, che includono manutenzione, aggiornamenti e supporto continuo. Tale modello di business da una parte crea flussi di ricavi ricorrenti, e dall'altra rafforza anche la relazione con i clienti, migliorando la fidelizzazione e riducendo la volatilità delle entrate **(**Kohtamäki et al., 2020). Allo stesso tempo, riprendendo i punti fondamentali riportati da Ciliberto et al. 2021, l'adozione di pratiche di economia circolare, migliora in primis la sostenibilità aziendale, ma contribuisce in secondo luogo alla riduzione dei costi operativi e all'apertura di nuovi mercati per materiali riciclati e prodotti rigenerati. Tutto questo senza contare che l'efficienza operativa è ulteriormente potenziata dall'uso di tecnologie di monitoraggio e analisi predittiva, che permettono di anticipare i guasti e pianificare la manutenzione in modo proattivo, riducendo i tempi di inattività e ottimizzando la produzione. Come infatti sappiamo la gestione dei dati attraverso Big Data Analytics, IA e machine learning consente alle aziende di identificare opportunità di miglioramento e di prendere decisioni basate su dati concreti, aumentando così la produttività e l'efficacia operativa. La sostenibilità aziendale viene inoltre notevolmente potenziata attraverso la gestione energetica avanzata e l'uso di fonti di energia rinnovabile, che riducono i consumi e incrementano l'efficienza operativa. Tecnologie come la blockchain migliorano la trasparenza e la tracciabilità lungo la supply chain, dimostrando l'eticità e la sostenibilità delle pratiche aziendali, fattori sempre più importanti per attrarre consumatori e investitori attenti ai temi sociali e ambientali (Kılıç, 2023). Al netto di tutti questi aspetti si riporta di seguito alla pagina successiva in figura 3.2 la schematizzazione del concetto di economia circolare.

Si può desumere dunque che l'Industria 4.0 è in grado di offrire alle aziende un vantaggio competitivo duraturo attraverso l'innovazione, la differenziazione, l'efficienza operativa e l'ottimizzazione dell'esperienza del cliente, soprattutto perché l'agilità, la flessibilità e l'attenzione alla sostenibilità sono diventati fattori cruciali per mantenere una posizione di leadership nel mercato e garantire la resilienza a lungo termine. Le aziende che sapranno sfruttare appieno il potenziale dell'Industria 4.0 avranno la facoltà di creare valore aggiunto al loro operato, migliorare la redditività e costruire un vantaggio competitivo solido e sostenibile, in un panorama globale sempre più competitivo e interconnesso.

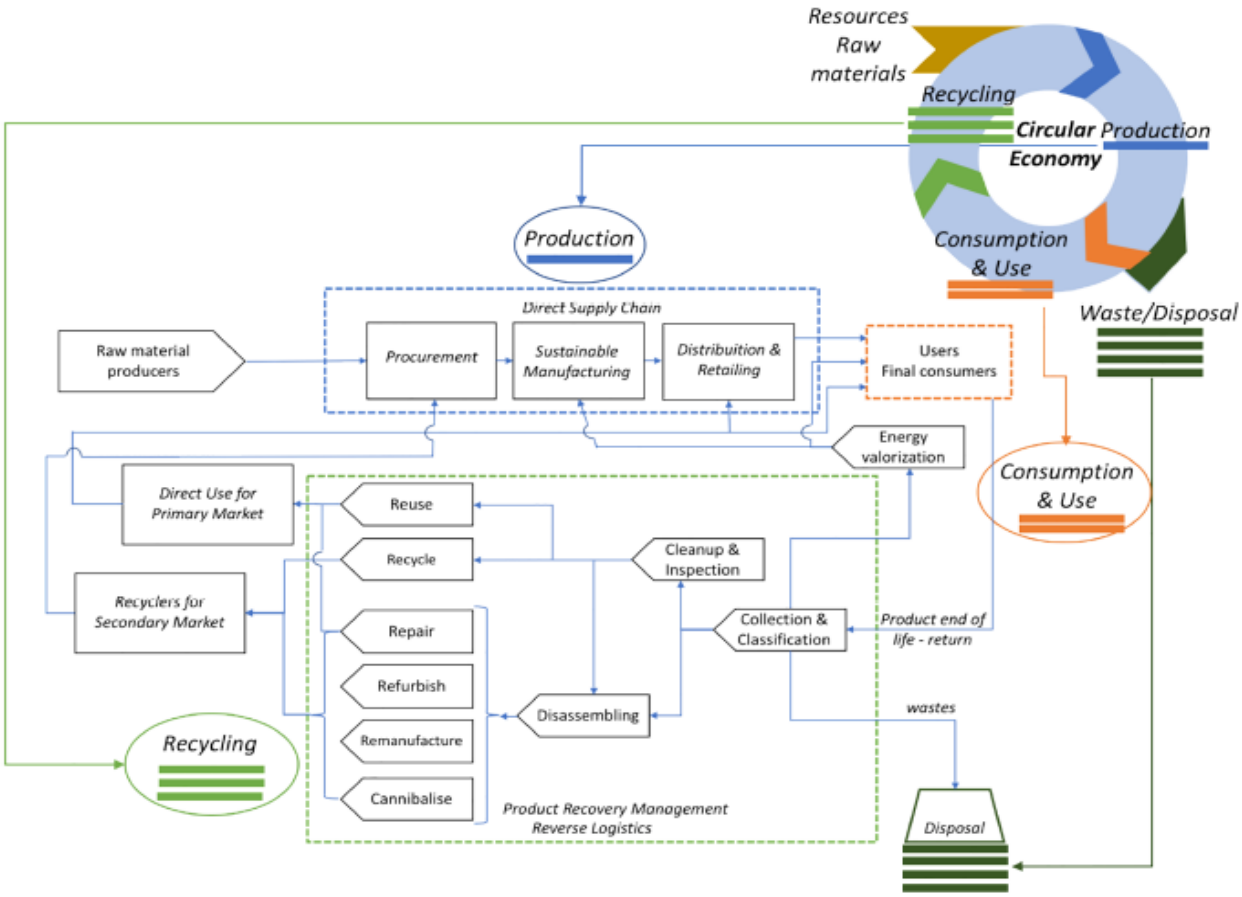

Fig. 3.2: *Produzione e logistica inversa all'interno del ciclo dell'economia circolare. Fonte: Ciliberto et al., 2021.*

3.4 Sfide e considerazioni

È proprio perché l'Industria 4.0 rappresenta una trasformazione radicale nel modo in cui le imprese operano, vista la portata e la potenzialità delle tecnologie abilitanti, che l'integrazione di esse nelle realtà aziendali comporta di pari passo delle inevitabili criticità. Infatti, come sappiamo, l'adozione di queste tecnologie comporta una serie di rischi ed oneri significativi che le aziende devono gestire con attenzione per garantire una transizione fluida e di successo. Questi aspetti critici, che possono essere tecnologici, organizzativi e finanziari, richiedono strategie ben pianificate e un impegno costante per essere affrontati efficacemente, per cui in questa sezione discuteremo anche su delle possibili best practices da adottare in modo da prevenirli o limitarli.

3.4.1 Costi di Implementazione

A dispetto di tutti i benefici che possono portare, è pur vero che l'adozione delle tecnologie dell'Industria 4.0 richiede alle imprese di affrontare una serie di costi spesso abbastanza significativi, che possono variare notevolmente a seconda della dimensione dell'impresa, del settore di appartenenza e della specifica tecnologia implementata.

Questi investimenti secondo moltissimi studi come quelli di Brettel et al. 2014, Kagermann et al. 2013, Schwab 2017 e Alkaaran et al. 2022, risultano indispensabili non solo per l'acquisto di nuove tecnologie, ma anche per la formazione del personale, l'integrazione dei sistemi esistenti e l'adeguamento delle infrastrutture. Per quanto riguarda quelli prettamente iniziali, essi includono l'acquisto di nuovi macchinari e attrezzature, come robot industriali, stampanti 3D, sensori IoT e sistemi di gestione avanzata della produzione. A titolo di esempio, l'introduzione di sistemi di automazione richiede l'acquisto di robot industriali e sistemi di controllo automatizzati, che possono spesso arrivare a costare centinaia di migliaia di euro per unità; tuttavia, sebbene costosi, promettono notevoli miglioramenti in termini di efficienza e produttività (Alkaaran et al., 2022). Analogamente, l'adozione della stampa 3D comporta costi variabili a seconda delle capacità e delle dimensioni delle stampanti, ma risulta fondamentale per la produzione additiva.

A ciò si aggiungono i costi legati all'aggiornamento delle infrastrutture esistenti per garantire la compatibilità con le nuove tecnologie, senza contare che anche sul fronte dei software e dei sistemi informatici, le imprese devono affrontare spese consistenti per l'implementazione di sistemi di gestione delle risorse aziendali (ERP) e di esecuzione della produzione (MES). Questi sistemi richiedono non solo l'acquisto di licenze software, ma anche personalizzazioni e integrazioni complesse con i sistemi esistenti. L'introduzione di soluzioni di intelligenza artificiale e machine learning, inoltre, comporta costi significativi per lo sviluppo di algoritmi avanzati e per la creazione di un'infrastruttura capace di gestire ed elaborare grandi quantità di dati. Inoltre, il passaggio a infrastrutture IT più robuste e sicure, necessarie per supportare un aumento dell'elaborazione dei dati, comporta ulteriori costi onerosi (Hoyer et al., 2020). Parallelamente, la migrazione verso soluzioni cloud comporta costi elevati sia per l'abbonamento ai servizi cloud sia per l'adeguamento delle infrastrutture IT, compresa la costruzione o l'aggiornamento di data center.

Un altro aspetto cruciale è la necessità di dover formare il personale in modo che vi sia un uso efficace delle nuove tecnologie. L'adozione di tecnologie avanzate richiede, infatti, che il personale acquisisca competenze specifiche, non solo per l'uso e la manutenzione di nuovi sistemi, ma anche per la gestione dei dati e la sicurezza informatica. Questo, dunque, comporta inevitabilmente costi aggiuntivi per corsi di formazione, workshop e consulenze specialistiche, e talvolta potrebbe essere necessario assumere nuovo personale con competenze specializzate, aumentando ulteriormente i costi iniziali (Schwab, 2017). Va sottolineato poi, seguendo lo studio di Alkaaran et al., 2022, che la promozione di una cultura aziendale orientata all'innovazione e al cambiamento tecnologico richiede di conseguenza investimenti in programmi di formazione però continua e supporto al personale, al fine di garantire una transizione agevole e minimizzare la resistenza al cambiamento.

Oltre agli investimenti iniziali poi, l'adozione dell'Industria 4.0 comporta come sappiamo anche un incremento dei costi operativi. Questi includono la manutenzione delle nuove tecnologie, il supporto tecnico continuo e l'eventuale aggiornamento dei sistemi.

Difatti, i macchinari e le attrezzature avanzate necessitano di una manutenzione regolare per funzionare in modo ottimale, e i costi ad essa associati possono essere piuttosto elevati, specialmente se si parla di tecnologie complesse come i sistemi di robotica e le piattaforme di intelligenza artificiale.

Inoltre, le imprese devono prevedere il costo del supporto tecnico continuo per risolvere eventuali problemi e garantire ovviamente che i sistemi rimangano operativi e aggiornati, dato che le tecnologie digitali avanzano ed evolvono rapidamente in maniera più o meno continua, e ciò richiede dunque alle imprese di aggiornare frequentemente i loro sistemi per mantenere la propria competitività. Questo può includere aggiornamenti software, sostituzione di hardware obsoleti e l'integrazione di nuove funzionalità (Hoyer et al., 2020).

Anche la ricerca e lo sviluppo (R&S) richiedono investimenti significativi. L'implementazione di progetti pilota, ad esempio, consente di testare nuove tecnologie e processi, valutandone l'efficacia prima di una diffusione su larga scala. Inoltre, la creazione di laboratori di innovazione e centri di ricerca dedicati è essenziale per lo sviluppo di nuove tecnologie e modelli di business, pur comportando costi elevati. Questi aggiornamenti frequenti, nonostante siano essenziali per rimanere al passo con l'evoluzione tecnologica, possono rappresentare una spesa continua e non trascurabile (Kılıç, 2023).

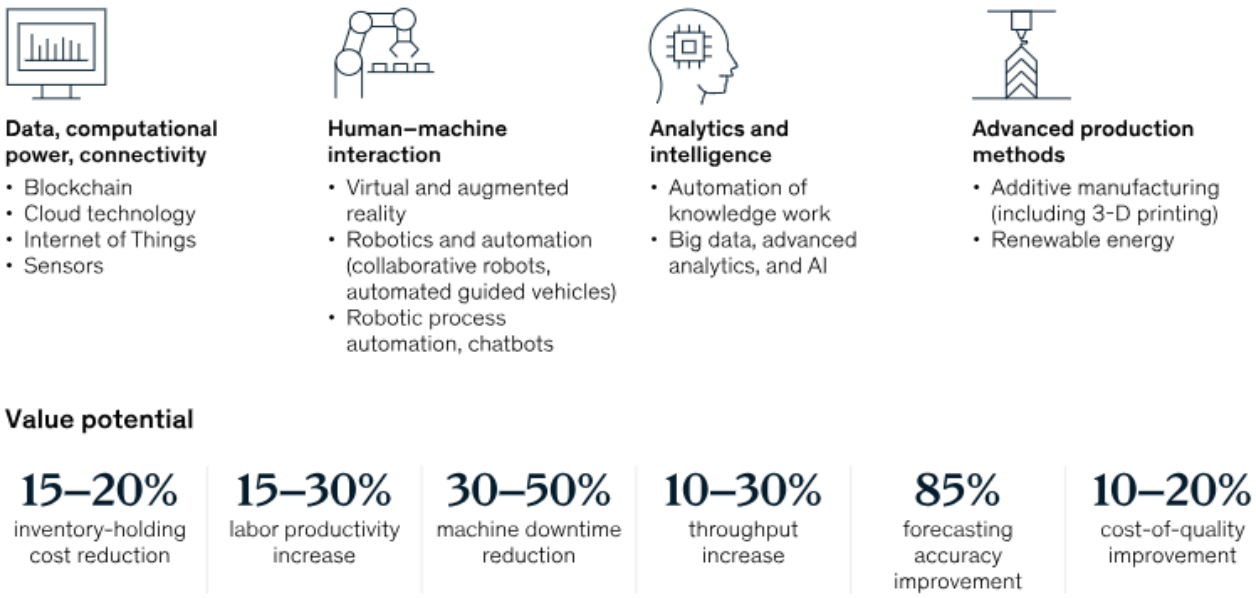

Fig. 3.3: *Aree di valore potenziale dell'Industria 4.0.*
Fonte: Gregolinska et al. 2022.

Quindi malgrado tutte le potenzialità che I4.0 è in grado di offrire (figura 3.3) vi saranno sempre dei costi associati e talvolta questi possono risultare difficili da sostenere. Al fine di compensare tutti questi oneri, diverse imprese decidono di collaborare con università e centri di ricerca attraverso partnership strategiche o consorzi, accelerando così il processo di innovazione e abbassando i costi, ma questa pratica richiede comunque un impegno finanziario iniziale (PwC, 2016).

Infine, le imprese devono considerare i rischi e le implicazioni finanziarie associati a questi investimenti, visto che costi iniziali elevati possono rappresentare un rischio finanziario non di poco conto, soprattutto per le piccole e medie imprese, che dispongono di risorse limitate. Il tempo necessario per recuperare tali investimenti può essere lungo, e richiede una pianificazione attenta per garantire la sostenibilità finanziaria.

Le aziende possono comunque cercare fonti di finanziamento esterne, come sovvenzioni governative o investitori privati, per alleviare l'onere finanziario iniziale (Kılıç, 2023).

Anche se dunque gli investimenti iniziali elevati rappresentano una delle principali sfide per l'adozione delle tecnologie dell'Industria 4.0, sono indispensabili per ottenere benefici a lungo termine, tra cui miglioramenti in efficienza operativa, innovazione, competitività e sostenibilità. Le aziende devono quindi valutare attentamente costi e benefici, attraverso la pianificazione di strategie di implementazione al fine di minimizzare i rischi finanziari e massimizzare il ritorno sugli investimenti, e gestirli in modo efficace per evitare pressioni finanziarie eccessive per assicurare un ritorno sugli investimenti (ROI) positivo, che potrebbe richiedere tempo per manifestarsi. I costi di implementazione possono influenzare il flusso di cassa dell'azienda, e le PMI potrebbero affrontare difficoltà nell'accesso ai finanziamenti necessari.

È quindi cruciale sviluppare una strategia finanziaria che bilanci l'investimento tecnologico con la sostenibilità economica. Non dimentichiamo inoltre che il contesto 4.0 può contribuire alla disparità economica tra grandi aziende e PMI. Ovviamente le prime, disponendo di maggiori risorse finanziarie e accesso a capitali, possono permettersi investimenti significativi in tecnologie avanzate e dunque progredire ed evolversi molto più facilmente, mentre le PMI potrebbero dover lottare duramente per tenere il passo, rischiando di rimanere indietro in termini di competitività, anche se attualmente molti paesi i governi stanno implementando programmi di supporto per aiutare le PMI a superare queste barriere. Anche se comunque questi programmi includono incentivi fiscali, sovvenzioni, e accesso facilitato al credito per sostenere l'adozione delle tecnologie 4.0, la disponibilità e l'efficacia di tali supporti variano significativamente da un paese all'altro, rendendola perciò talvolta inattendibile (Hoyer et al., 2020).

3.4.2 Rischi tecnologici-finanziari nell'Industria 4.0

- *Integrazione dei sistemi e compatibilità tecnologica:* una delle principali sfide tecnologiche associate all'Industria 4.0 è l'integrazione dei nuovi sistemi con quelli esistenti, poiché possono insorgere difficoltà qualora i vecchi sistemi non siano compatibili con le nuove tecnologie, generando interruzioni operative e costi imprevisti. In questo contesto, è fondamentale garantire che le nuove tecnologie siano scalabili per supportare la crescita futura dell'azienda; questo perché in assenza di scalabilità, l'efficacia delle soluzioni adottate potrebbe essere compromessa, richiedendo ulteriori investimenti per adattarsi alle esigenze future (Hoyer et al., 2020).

- *Elevati costi di aggiornamento:* un ulteriore ostacolo tecnologico è rappresentato dagli elevati costi di aggiornamento (oltre a quelli di implementazione appena visti) delle nuove tecnologie, dato che le imprese devono affrontare una serie di costi diretti e indiretti che possono influire significativamente sulla loro redditività e stabilità finanziaria, specialmente nel breve termine. Tra questi i più rilevanti si riscontrano negli investimenti in tecnologie e infrastrutture, ossia quelli derivanti dall'acquisizione e il mantenimento di macchinari avanzati, robot, sensori IoT, e piattaforme di AI, i quali richiedono investimenti significativi in hardware, software e infrastrutture.

Inoltre, le imprese devono considerare i costi di aggiornamento continuo per mantenere la competitività, nonché l'investimento in infrastrutture IT, come server e reti di comunicazione ad alta velocità, necessari per supportare le nuove tecnologie (McKinsey & Company, 2017)[39]. Da non dimenticare che per molte aziende, specialmente le PMI, questi investimenti possono rappresentare una significativa pressione sulla liquidità, dal momento che un'eventuale incapacità di gestire correttamente queste spese potrebbe portare a difficoltà finanziarie, ritardi nei pagamenti, o alla necessità di contrarre debiti onerosi.

- *Rischi di sicurezza cibernetica e protezione dei dati:* come discusso nel precedente capitolo, l'Industria 4.0, con la sua forte dipendenza dalla digitalizzazione e dall'interconnessione, espone le imprese a nuovi rischi di sicurezza cibernetica. La protezione dei dati e delle infrastrutture digitali è una delle principali preoccupazioni per le aziende che adottano queste tecnologie. Soprattutto nel caso di attacchi informatici come ransomware, phishing, e attacchi DDoS, le conseguenze possono essere devastanti, portando alla perdita di dati, interruzioni operative, e danni alla reputazione. Implementare e mantenere quindi misure di sicurezza cibernetica adeguate, come firewall, sistemi di rilevamento delle intrusioni e crittografia dei dati, può essere estremamente costoso, senza contare il fatto che risulta necessario investire anche in audit di sicurezza regolari e nella formazione del personale per ridurre il rischio di incidenti di sicurezza (Hoyer et al., 2020).

Inoltre, come riportato dal World Economic Forum nel 2020, le aziende devono costantemente attenersi alle normative sulla protezione dei dati, come il GDPR in Europa, che impongono ulteriori obblighi in termini di gestione e protezione dei dati personali. La non conformità può comportare sanzioni finanziarie significative e danni alla reputazione.

Tutto questo per arrivare al lato finanziario, che è quello di interesse in tale sezione: gli incidenti di sicurezza possono difatti non solo compromettere la fiducia dei clienti, ma anche avere conseguenze finanziarie dirette. Basti pensare al fatto che un attacco informatico può causare l'interruzione delle operazioni aziendali, con conseguente perdita di produttività e ricavi, e più o meno a lungo termine che sia comporta molto spesso conseguenze ampiamente gravose. Inoltre, le imprese devono affrontare i costi di ripristino, inclusi la riparazione dei sistemi danneggiati e il recupero dei dati persi. A tal proposito un breach di sicurezza che compromette i dati personali dei clienti può anche avere un impatto duraturo sulla fiducia del pubblico, traducendosi in una perdita di clienti e difficoltà nel fidelizzarne di nuovi (Hoyer et al., 2020).

3.4.3 Rischi organizzativi-finanziari nell'Industria 4.0

Per quanto concerne il fronte organizzativo, la resistenza al cambiamento rappresenta una barriera significativa, principalmente perché è dipende molto dalla filosofia dell'impresa e dal contesto in cui essa opera. La cultura aziendale, infatti, può influenzare fortemente l'accoglienza delle nuove tecnologie, e i dipendenti potrebbero essere riluttanti ad adottare nuovi processi per timore di perdere il lavoro o per semplice avversione al cambiamento.

[39] McKinsey Global Institute, 2017, *The Case for Digital Reinvention,* McKinsey & Company.

Una comunicazione insufficiente e una scarsa partecipazione dei dipendenti possono accentuare questa resistenza, rendendo fondamentale coinvolgere il personale fin dall'inizio e mantenere una comunicazione chiara e trasparente riguardo ai cambiamenti in atto (Kohtamäki et al., 2020).

Un altro rischio organizzativo cruciale è rappresentato dal gap di competenze. Infatti, la mancanza di competenze tecniche adeguate tra il personale può ostacolare l'implementazione delle nuove tecnologie, rendendo essenziale investire nella formazione continua e nello sviluppo delle competenze per colmare questo divario. In aggiunta, la transizione verso l'Industria 4.0 può richiedere la ridefinizione dei ruoli e delle responsabilità all'interno dell'azienda, generando incertezze e tensioni tra i dipendenti. Dal momento che com'è noto le tecnologie dell'Industria 4.0 evolvono rapidamente, e richiedendo perciò una formazione continua per i dipendenti, le aziende devono investire in programmi di formazione, workshop, e talvolta corsi specialistici per mantenere il personale aggiornato sulle nuove competenze richieste. Siccome poi il mercato del lavoro per competenze avanzate è altamente competitivo, ciò incrementa costi salariali più elevati per attrarre e trattenere personale qualificato. Questo può aumentare ulteriormente i costi operativi e la complessità gestionale (Alkaaran et al., 2022). Dato che dunque la transizione all'Industria 4.0 può richiedere la ridefinizione dei ruoli e delle responsabilità all'interno dell'azienda, creando incertezze e potenziali tensioni, le aziende dovrebbero esplorare opportunità di collaborazione con altre imprese, università e centri di ricerca per condividere conoscenze e risorse. A tal proposito, opportunità come le partnership strategiche possono facilitare l'accesso alle ultime tecnologie, migliorare l'innovazione e ridurre i rischi associati all'adozione delle nuove tecnologie.

Infine, e soprattutto, è bene rammentare che la formazione non è solo una questione tecnica, ma anche culturale. Le aziende possono dover affrontare talvolta una certa resistenza al cambiamento da parte del personale, il che può rallentare l'implementazione delle nuove tecnologie e aumentare i costi associati alla gestione del cambiamento, e di questo parleremo ancora nel capitolo dedicato agli impatti sociali (Kılıç, 2023).

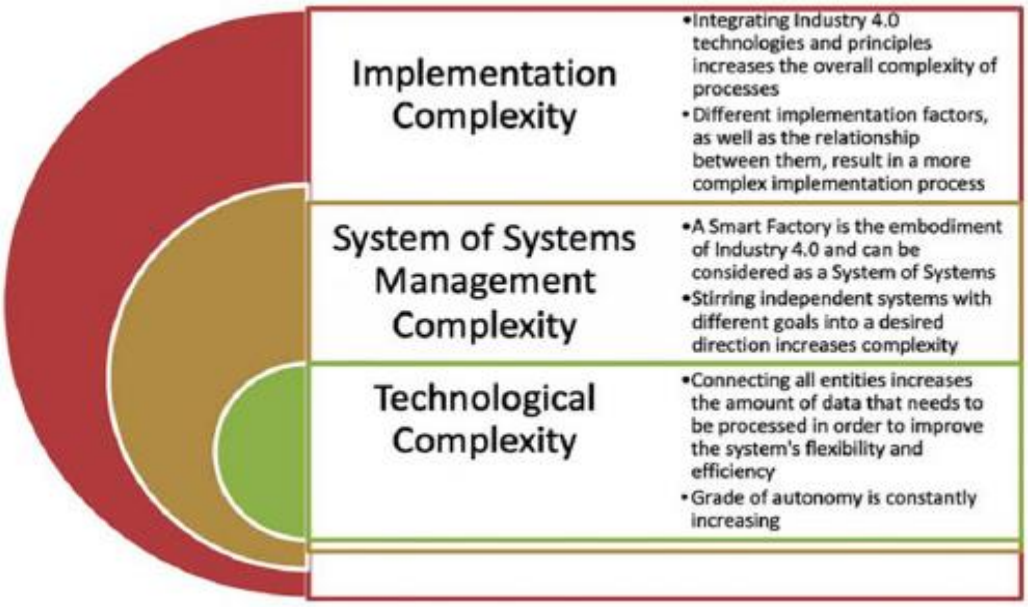

Fig. 3.4: *Le complessità dell'Industria 4.0.*
Fonte: Hoyer et al., 2020.

3.4.4 Strategie di gestione del cambiamento per l'adozione dell'Industria 4.0

- *Pianificazione strategica e graduale:* per affrontare i rischi dell'Industria 4.0, le aziende devono adottare strategie di gestione del cambiamento ben strutturate. La pianificazione strategica è fondamentale e include la creazione di una roadmap dettagliata per l'implementazione delle nuove tecnologie, con obiettivi chiari, tempistiche definite e risorse adeguate. Definire una chiara roadmap per l'adozione tecnologica, infatti, aiuta a identificare i passi necessari, le priorità, e i potenziali ostacoli, inoltre deve essere flessibile per adattarsi ai cambiamenti tecnologici e di mercato. Oltre a questo, è essenziale coinvolgere tutti gli stakeholder, dai dipendenti ai fornitori, fino ai clienti, nella pianificazione e implementazione delle nuove tecnologie. Questo aiuta a costruire il consenso e a mitigare la resistenza al cambiamento (Kılıç, 2023). Le aziende di successo hanno spesso adottato inoltre un approccio graduale all'Industria 4.0, iniziando con progetti pilota per testare nuove tecnologie prima di estenderle su larga scala, seguendo dunque una implementazione step-by-step. L'utilità e la convenienza di questo approccio consistono nella possibilità che esso offre di valutare l'impatto delle nuove tecnologie, mitigare i rischi e ottenere il buy-in dei principali stakeholder (Alkaaran et al., 2022).

- *Integrazione di pratiche sostenibili:* le imprese devono anche considerare l'impatto ambientale delle loro operazioni e adottare tecnologie che supportano la sostenibilità, contribuendo così a migliorare la reputazione aziendale e a soddisfare le aspettative dei consumatori e degli investitori. Ciò si traduce nella buona pratica di investire in tecnologie che riducono l'impatto ambientale, come l'efficienza energetica e l'uso di materiali riciclabili, che, come sappiamo, non solo aiuta a soddisfare le normative ambientali ma può anche rappresentare un vantaggio competitivo, dato che l'adozione di pratiche sostenibili rafforza l'immagine aziendale e può attrarre investitori e clienti sensibili alle questioni ambientali (Kılıç, 2023).

- *Supporto della dirigenza e coinvolgimento-formazione del personale*: in questo contesto il supporto della dirigenza gioca un ruolo cruciale nel successo della trasformazione verso l'Industria 4.0. I leader aziendali devono essere visibili sostenitori del cambiamento e guidare con l'esempio. Identificare e coinvolgere i cosiddetti "Champions" del cambiamento all'interno dell'organizzazione, che possano promuovere l'adozione delle nuove tecnologie e supportare i colleghi, è essenziale per facilitare il processo. Prima di tutto infatti i dirigenti devono mostrare un forte impegno verso il cambiamento, comunicando chiaramente la visione e i benefici dell'Industria 4.0 a tutti i livelli dell'organizzazione. Come secondo punto, anche identificare figure chiave all'interno dell'azienda che possano fungere da ambasciatori del cambiamento è fondamentale, poiché questi individui possono influenzare positivamente i colleghi e facilitare l'accettazione delle nuove tecnologie. Altra buona pratica è poi quella di adoperarsi per la creazione di canali al fine di raccogliere feedback dai dipendenti e adattare le strategie di implementazione in base ai loro input, perché è altrettanto importante per mantenere alta la motivazione e ridurre la resistenza alla trasformazione digitale (Kohtamäki et al., 2020). Un'altra best practice chiave riportata da Alkaaaran et al. 2020 consiste nell'investire nella formazione continua del personale. Basti osservare che per questo motivo le aziende leader hanno istituito programmi di formazione per sviluppare le competenze necessarie per operare e mantenere le tecnologie avanzate dell'Industria 4.0, le quali sono in costante evoluzione. Inoltre, è importante assecondare e supportare l'integrazione dei sistemi aziendali esistenti con le nuove tecnologie 4.0. Utilizzare piattaforme interoperabili e standardizzate consente una maggiore flessibilità e facilità d'uso, riducendo il rischio di frammentazione e aumentando l'efficienza operativa.

- *Collaborazioni con enti esterni e visione green*: Oltre a questo, le aziende di successo hanno saputo sfruttare partnership strategiche con fornitori di tecnologia, università, e altre imprese per agevolare l'adozione dell'Industria 4.0, poiché come abbiamo discusso una collaborazione fruttuosa nell'ecosistema dell'innovazione può portare a una condivisione delle conoscenze, una riduzione dei costi e un accesso più rapido alle ultime tecnologie. Infine, non dimentichiamo che integrare anche la sostenibilità nelle strategie di Industria 4.0 è una best practice che sta guadagnando importanza. Le aziende che adottano tecnologie ecocompatibili e ottimizzano l'uso delle risorse non solo migliorano la loro reputazione, ma possono anche ottenere vantaggi economici a lungo termine (Kılıç, 2023).

3.5 Case Studies

Ora verranno esaminati diversi case study che sono in grado di fornire un ottimo esempio sul come adottare le migliori pratiche all'interno di vari settori. I case study sono importanti perché forniscono evidenza empirica ed esempi concreti di come le aziende hanno implementato tecnologie o strategie, permettendo di apprendere dai successi e dai fallimenti altrui. In particolare, sono stati raccolti casi che offrono un'analisi dettagliata del ROI, che aiuta le aziende a valutare i benefici economici di nuove iniziative. Inoltre, supportano le decisioni aziendali fornendo dati reali su cui basarsi e facilitano l'adattamento di soluzioni a contesti specifici, e soprattutto, promuovendo la condivisione di best practices, stimolano l'innovazione e la competitività in quel campo.

- **Siemens**: la fabbrica di Siemens ad Amberg produce componenti di automazione per i sistemi di produzione industriale. Di fronte alla necessità di migliorare la flessibilità, ridurre i costi e mantenere elevati standard di qualità, Siemens ha deciso di trasformare lo stabilimento in una Smart Factory. Nello specifico, Siemens ha implementato una serie di tecnologie avanzate, tra cui l'Internet of Things, l'intelligenza artificiale, il cloud computing, la robotica avanzata e l'automazione, ed il cuore della trasformazione è stato un sistema di produzione completamente integrato e digitalizzato, che consente la comunicazione in tempo reale tra macchinari, sistemi e persone.

Parlando in termini finanziari, Siemens ha investito circa 100 milioni di euro per trasformare la fabbrica di Amberg in una fabbrica digitale, e questo includeva quindi l'acquisizione di nuove tecnologie, l'aggiornamento delle infrastrutture esistenti e la formazione del personale. Successivamente, dopo l'implementazione, la fabbrica ha registrato una riduzione dei costi operativi del 30%. Questo risparmio è stato ottenuto attraverso una riduzione dei tempi di inattività delle macchine (grazie alla manutenzione predittiva basata su IoT), un minor consumo energetico e una riduzione dei costi di manodopera grazie all'automazione. Parallelamente, la produttività della fabbrica è aumentata del 20%, permettendo di produrre un numero maggiore di componenti senza dover espandere fisicamente lo stabilimento.

Di conseguenza un tale incremento ha avuto un impatto positivo sui ricavi e ha migliorato il flusso di cassa operativo. In aggiunta, l'utilizzo dell'intelligenza artificiale e dell'analisi dei dati in tempo reale ha ridotto il tasso di errore nella produzione di oltre il 50%, il che ha portato ad una significativa riduzione degli scarti e, conseguentemente, a un miglioramento del margine operativo.

Siemens ha inoltre registrato un ritorno sull'investimento significativo grazie alla trasformazione della fabbrica: calcolando il ROI sulla base dei risparmi ottenuti e dei costi ridotti, Siemens ha ottenuto infatti un ROI annuo di circa il 15% sull'investimento iniziale, con un periodo di payback di circa 7 anni. Analizzando poi i flussi di cassa, grazie ai risparmi sui costi e all'aumento della produttività, la fabbrica ha generato un flusso di cassa operativo positivo già dal primo anno, che ha continuato a crescere con l'ottimizzazione continua dei processi. Inoltre, dopo aver coperto i costi di investimento iniziale, Siemens ha registrato flussi di cassa netti positivi a partire dal terzo anno, accelerando così il recupero dell'investimento (Siemens, 2019 - Amberg)[40].

- **Schneider Electric**: prendiamo in esame ora il caso della Schneider Electric, la quale ha implementato la piattaforma "EcoStruxure", che integra similmente alla fabbrica Siemens l'IoT, l'intelligenza artificiale, il cloud computing e altre tecnologie avanzate. Questa piattaforma è stata utilizzata per migliorare l'efficienza energetica, l'automazione e la gestione dei processi produttivi nei suoi impianti e nelle soluzioni fornite ai clienti.

Come il primo esempio, Schneider Electric ha investito sempre circa 100 milioni di euro nello sviluppo e nell'implementazione della piattaforma EcoStruxure e nelle tecnologie associate. Questo investimento includeva nello specifico lo sviluppo della piattaforma tecnologica, l'aggiornamento delle infrastrutture esistenti, la formazione del personale e l'implementazione nei propri stabilimenti e nei siti dei clienti della piattaforma.

Dopo l'implementazione di EcoStruxure, Schneider Electric ha poi registrato un miglioramento significativo nei flussi di cassa operativi, che non è stato altro che il risultato diretto della riduzione dei costi operativi, grazie a una maggiore efficienza energetica (fino al 20% di risparmio energetico), una manutenzione predittiva che ha ridotto i tempi di inattività e un aumento della produttività. In particolare i risparmi sui costi operativi sono stati quantificati in circa 30 milioni di euro annui, derivanti principalmente dalla riduzione del consumo energetico, dai minori costi di manutenzione e dall'ottimizzazione della supply chain. Inoltre, con tutti i flussi di cassa operativi positivi, Schneider Electric è stata in grado di coprire l'investimento iniziale entro circa 4 anni; dopodiché i flussi di cassa netti sono diventati positivi, contribuendo all'accumulo di capitale per ulteriori investimenti in innovazione e sviluppo.

Per quanto riguarda il ROI, esso è stato calcolato sulla base dei risparmi sui costi e dei ricavi aggiuntivi generati dall'implementazione delle tecnologie 4.0. Considerando un risparmio annuo di 30 milioni di euro su un investimento di 100 milioni di euro, arrivando ad aggirarsi introno al 30%.Tuttavia, considerando gli ammortamenti e i costi di aggiornamento continuo, il ROI si è stabilizzato circa al 15% annuo nel lungo termine. Si evidenzia come il payback period relativamente breve di questo esempio (equivalente appunto a 4 anni) sia enormemente indicativo del successo dell'iniziativa e del forte impatto positivo sulle finanze aziendali (General Electric, 2020)[41].

[40] Siemens, 2019, *Case Study: The Digital Enterprise – Amberg.*

[41] General Electric, 2020, *Digital Thread for Aerospace*

- **Bosch**: con un vasto portafoglio di prodotti e servizi, Bosh si è trovata di fronte alla sfida di dover mantenere alta la qualità dei suoi prodotti riducendo al contempo i costi operativi e migliorando l'efficienza. Per affrontare queste sfide, la nota multinazionale tedesca ha adottato la strategia della "Fabbrica 4.0", implementando tecnologie come IoT, AI, big data e robotica avanzata.

Parliamo in particolare del progetto di trasformazione digitale che Bosh ha avviato nel suo stabilimento di Blaichach in Germania, specializzato nella produzione di componenti per sistemi frenanti. L'azienda ha quindi implementato sensori IoT, analisi dei dati in tempo reale, manutenzione predittiva e automazione avanzata per ottimizzarne il processo produttivo. Grazie all'adozione di questa fabbrica, Bosch ha registrato una riduzione dei tempi di inattività delle macchine del 20%, con un conseguente miglioramento della produttività. Inoltre, la manutenzione predittiva ha ridotto i costi di manutenzione di circa il 25%. Questi miglioramenti hanno portato a un aumento dei flussi di cassa operativi, generando risorse finanziarie aggiuntive per l'azienda. La capacità di monitorare i processi produttivi in tempo reale ha consentito inoltre a Bosch di ridurre gli scarti di produzione del 15%, migliorando ulteriormente i margini di profitto e rafforzando i flussi di cassa operativi. Dopo aver coperto l'investimento iniziale, Bosch ha in aggiunta registrato un aumento dei flussi di cassa netti, che ha permesso all'azienda di reinvestire in ulteriori innovazioni e miglioramenti operativi.

Bosch ha investito circa 50 milioni di euro per implementare le tecnologie 4.0 nel suo stabilimento di Blaichach, inclusi i costi per l'acquisto di nuove tecnologie, l'aggiornamento delle infrastrutture e la formazione del personale. In più, con un risparmio annuo stimato in 15 milioni di euro (considerando la riduzione dei costi operativi, il miglioramento dell'efficienza e la riduzione degli scarti), Bosch ha ottenuto un ROI significativo, pari al 30%, che ha rappresentato un ritorno molto positivo sull'investimento. Inoltre, l'azienda ha recuperato l'investimento iniziale in circa 3-4 anni grazie ai risparmi ottenuti, dimostrando ampiamente l'efficacia della strategia della fabbrica 4.0 (Bosch, 2018-Predictive Maintenance)[42].

- **Procter & Gamble**: un altro interessante esempio è costituito da P&G, la quale opera da sempre in un settore altamente competitivo. Nel dettaglio si è trovata a dover affrontare la necessità di migliorare l'efficienza della supply chain, ridurre i costi di produzione e rispondere rapidamente alle esigenze dei clienti. P&G ha quindi deciso di conseguenza di adottare le tecnologie dell'Industria 4.0 nei suoi impianti produttivi, con l'obiettivo di aumentare la produttività e ottimizzare le operazioni, implementando dunque una combinazione di tecnologie avanzate, tra cui l'IoT per il monitoraggio in tempo reale delle macchine e dei processi produttivi, Big Data Analytics per l'analisi avanzata dei dati operativi al fine di ottimizzare le prestazioni, l'automazione avanzata e robotica in modo da aumentare la velocità e l'efficienza delle linee di produzione e l'IA per la previsione della domanda e la gestione ottimizzata delle scorte. Dopo tale trasformazione digitale, P&G ha registrato un miglioramento significativo nei flussi di cassa operativi, poiché una maggiore automazione e l'uso dell'AI hanno consentito una riduzione dei costi operativi del 20-30%, grazie all'ottimizzazione delle linee produttive e alla riduzione dei tempi di fermo macchina. Inoltre, l'uso dei big data e dell'AI per la previsione della domanda ha permesso a P&G di ridurre i livelli di inventario di circa 15-20%, migliorando il flusso di cassa grazie alla diminuzione del capitale bloccato in magazzino.

[42] Bosch, 2018, *Predictive Maintenance: The Future of Machinery Maintenance.*

Come ulteriore beneficio, i diversi miglioramenti nei flussi di cassa operativi e la riduzione dei costi di inventario hanno portato a flussi di cassa netti positivi, che hanno contribuito a finanziare ulteriori investimenti in innovazione e espansione.

Parlando ora in termini di ritorno sull'investimento, P&G ha investito circa 200 milioni di dollari per implementare le tecnologie 4.0 nei suoi principali stabilimenti produttivi.

Grazie poi alla riduzione dei costi e all'aumento della produttività, l'azienda ha ottenuto risparmi annui di circa 60 milioni di dollari. Calcolando dunque il ROI sulla base di queste informazioni si arriva ad un valore che si attesta sul 30% di ritorno sui capitali impiegati, che come nel caso precedente rappresenta un valore molto positivo e conferma l'efficacia della strategia. Concludendo, P&G ha recuperato l'investimento iniziale in circa 3-4 anni, grazie ai risparmi operativi e alla maggiore efficienza, rendendo di conseguenza il progetto altamente remunerativo (McKinsey & Company, Bain)[43].

- **BASF**: con una vasta gamma di prodotti chimici, BASF, azienda chimica nonché società europea rinomata in tutto il mondo, ha affrontato la necessità di ottimizzare i propri processi produttivi per ridurre i costi operativi e migliorare la sostenibilità ambientale. La sfida principale consisteva nell'integrare tecnologie avanzate per ottenere maggiore efficienza e migliorare la gestione delle risorse; dunque BASF ha implementato una serie di tecnologie digitali nei suoi impianti, in particolare l'AI al fine di ottimizzare i processi di produzione e di prevedere la manutenzione necessaria, riducendo così i tempi di inattività, Big Data Analytics per analizzare grandi volumi di dati provenienti dai processi produttivi e migliorare l'efficienza delle operazioni, e l'automazione avanzata in modo da diminuire il tasso di errore umano e aumentare la produttività delle linee di produzione.

In seguito a tali implementazioni, l'adozione di AI e Big Data ha consentito a BASF di ridurre significativamente i costi operativi attraverso l'ottimizzazione delle risorse e la riduzione degli sprechi, e ciò ha avuto un impatto positivo sui flussi di cassa operativi. Le tecnologie 4.0 hanno anche migliorato l'efficienza energetica degli impianti di BASF, riducendo i costi energetici e contribuendo a un flusso di cassa più solido.

Come abbiamo potuto aver modo di vedere BASF ha investito in modo significativo nella digitalizzazione dei suoi processi, con un focus particolare sulle tecnologie di AI e automazione avanzata, ma anche in questo caso otteniamo al netto di tutto un ROI elevato, con risparmi annuali consistenti derivanti dalla riduzione dei costi operativi e dal miglioramento dell'efficienza complessiva.
Inoltre, questo ROI è stato sostenuto da una riduzione dei costi energetici e un miglioramento della produttività, che hanno contribuito a un rapido recupero dell'investimento iniziale (BASF Report 2023, Bain)[44].

[43] https://www.mckinsey.com/industries/consumer-packaged-goods/our-insights/inside-p-and-ampgs-digital-revolution

[44] https://www.bain.com/insights/factory-of-the-future-how-industry-4-0-and-ai-can-transform-manufacturing/

Tabella 3.1: *Sintesi dei vari impatti economico-finanziari e le loro criticità.*

Aspetto	Impatti positivi	Rischi	Criticità finanziarie
Investimenti iniziali	- Aumento del valore competitivo delle imprese - Potenziale per incentivi governativi	- Alto costo iniziale di implementazione delle tecnologie - Necessità di continui aggiornamenti tecnologici	- Esigenza di finanziamenti esterni o accesso al credito per sostenere l'adozione - Ritardo nei ritorni sull'investimento
Costi operativi	- Riduzione dei costi operativi grazie all'automazione - Ottimizzazione delle risorse e dei tempi di produzione	- Errori tecnici o downtime costosi durante l'implementazione - Maggiori costi di manutenzione delle tecnologie	- Difficoltà nel calcolare i risparmi operativi iniziali - Dipendenza da fornitori di servizi per la manutenzione
Crescita economica	- Incremento della produttività - Accesso a nuovi mercati e modelli di business grazie alla digitalizzazione	- Saturazione del mercato in settori ad alta competitività	- Difficoltà nel tradurre l'innovazione in crescita economica sostenibile - Necessità di adattarsi rapidamente al mercato
Gestione dei dati	- Miglior utilizzo dei dati per decisioni strategiche - Capacità di analisi predittive e personalizzazione del prodotto	- Rischi legati alla sicurezza dei dati (cybersecurity)	- Alti costi per l'implementazione di tecnologie di protezione e gestione dei dati sensibili
Competitività globale	- Posizionamento migliore nei mercati internazionali - Capacità di differenziarsi rispetto alla concorrenza	- Maggior rischio di esclusione per le imprese che non adottano le nuove tecnologie	- Esclusione dai settori più innovativi in caso di mancata adozione - Dipendenza dalle tecnologie esterne
Formazione e occupazione	- Aumento di posti di lavoro specializzati - Innovazione dei processi di formazione per il personale	- Possibili licenziamenti o riduzione del personale in ruoli non tecnologici - Mancanza di competenze adeguate	- Costo elevato per la formazione del personale specializzato - Difficoltà nel reperire talenti tecnici nel breve termine
Flessibilità aziendale	- Miglioramento dell'adattabilità dei processi produttivi - Creazione di nuovi modelli di business flessibili	- Complessità nella gestione della trasformazione aziendale - Potenziali resistenze al cambiamento organizzativo	- Costi legati alla riorganizzazione interna e all'adozione di modelli flessibili - Interruzioni operative temporanee
Sostenibilità	- Riduzione dell'uso di materiali grazie alla stampa 3D e alla produzione efficiente - Riduzione dei consumi energetici	- Difficoltà nel mantenere la sostenibilità economica a lungo termine	- Costi aggiuntivi per tecnologie sostenibili - Eventuali sanzioni per non conformità ambientale

4 CAPITOLO 4: GLI IMPATTI AMBIENTALI

4.1 Premesse

Nell'avvento dell'Industria 4.0, emergono come abbiamo visto diverse tecnologie digitali avanzate come l'IoT), il Cloud Computing, i Big Data e la loro analisi e si sviluppano in modo significativo, trovando largo impiego nel contesto ambientale. In questa sezione parleremo degli impatti relativi proprio a tale ambito portati da questa realtà innovativa. A tal proposito citiamo lo studio di Li et al. (2020)[45] che offre una comprensione approfondita delle implicazioni delle tecnologie digitali sulle prestazioni aziendali e fornisce intuizioni manageriali su come promuovere la sostenibilità economica e ambientale nell'era dell'Industria 4.0 (figura 4.1). Analogamente a tale ricerca diversi studiosi nel corso degli anni hanno discusso e analizzato l'impatto di queste tecnologie emergenti sulle prestazioni delle aziende manifatturiere, e notano come esse tendono a integrare e configurare queste tecnologie front-end per creare infrastrutture abilitate al digitale, supportando così le loro operazioni e la gestione ambientale (Ivanov et al., 2019)[46]. Lo studio inoltre identifica queste tecnologie emergenti avanzate come un costrutto unificato che indica le capacità di elaborazione delle informazioni dell'azienda, e indaga empiricamente l'impatto coerente delle tecnologie digitali avanzate sulle prestazioni economiche e ambientali. I suoi risultati possono aiutare a comprendere meglio l'integrazione delle tecnologie digitali innovative ed emergenti nella nuova era dell'Industria 4.0 e il loro effetto coerente sullo sviluppo sostenibile delle aziende, ed evidenzia come le relazioni tra le tecnologie digitali e le prestazioni di sostenibilità non siano state completamente indagate.

Innanzitutto, questo studio rileva che le tecnologie digitali influenzano positivamente le prestazioni economiche e ambientali. In secondo luogo, lo studio conferma che l'adozione delle tecnologie digitali facilita la creazione di piattaforme di supply chain nell'era dell'Industria 4.0. Questa affermazione è coerente con quelle di Shou et al. (2018)[47], i quali indicano che le capacità di comunicazione interna e di integrazione dell'azienda comportano lo scambio di dati e informazioni in tempo reale attraverso le catene di approvvigionamento. Gli studiosi hanno tentato di stabilire i collegamenti tra le tecnologie digitali e i processi della catena di fornitura attraverso la revisione della letteratura narrativa o studi di casi esplorativi (Addo-Tenkorang e Helo, 2016[48]; Govindan et al., 2018[49]; Ben-Daya et al., 2019[50]).

---

[45] Li Y., Dai J., Cui L.,2020, The impact of digital technologies on economic and environmental performance in the context of industry 4.0: A moderated mediation model, *International Journal of Production Economics,* vol. 229.

[46] Ivanov D., Dolgui A. and Sokolov B., 2019, The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics*, International Journal of Production Research*, vol. 57, n. 3.

[47] Schou C., Andersen R.S., Chrysostomou D., Bøgh S. and Madsen O., 2018, Skill-based instruction of collaborative robots in industrial setting*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,* vol. 53, pp. 72-80.

[48] Addo-Tenkorang R. and Helo PT, 2016, Big data applications in operations/supply-chain management: A literature review, *Computers & Industrial Engineering,* vol. 101, pp. 528-543.

[49] Govindan K., Azevedo S., Carvalho H. and Cruz-Machado V., 2015, Lean, green and resilient practices influence on supply chain performance: interpretive structural modeling approach, *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 12, n. 1, pp. 15–34.

[50] Ben-Daya M., Hassini E., Bahrounm Z., 2019, Internet of things and supply chain management: a literature review, *International Journal of Production Research*, vol. 57, n. 15–16, pp. 4719–4742.

In terzo luogo, lo studio rivela che il dinamismo ambientale modera l'effetto indiretto delle tecnologie digitali per l'Industria 4.0 sulle prestazioni economiche e ambientali attraverso le piattaforme della catena di fornitura digitale. Inoltre indica che, in particolare in un ambiente dinamico, le aziende manifatturiere non dovrebbero solo fare affidamento sulle capacità interne di elaborazione delle informazioni mediante l'uso delle tecnologie digitali, ma devono anche fare in modo che le piattaforme più avanzate della catena di fornitura digitale accedano a informazioni più sufficienti dall'esterno, realizzando così performance economiche e ambientali più elevate. In altre parole, le tecnologie digitali e le piattaforme della catena di fornitura svolgono un ruolo più cruciale in un ambiente dinamico. Questi risultati possono contribuire ulteriormente alla comprensione delle condizioni contestuali per sviluppare e applicare le tecnologie digitali e le piattaforme della catena di fornitura.

Di seguito esamineremo in modo più dettagliato i principali benefici ambientali che conseguono dunque all'avvento dell'Industria 4.0, discutendo come essi possono potenzialmente impattare sulle performance aziendali e supportandoli con esempi e casi studio per ognuno, non mancando però ovviamente di discutere sulle problematiche e criticità relative alla questione ecosostenibile.

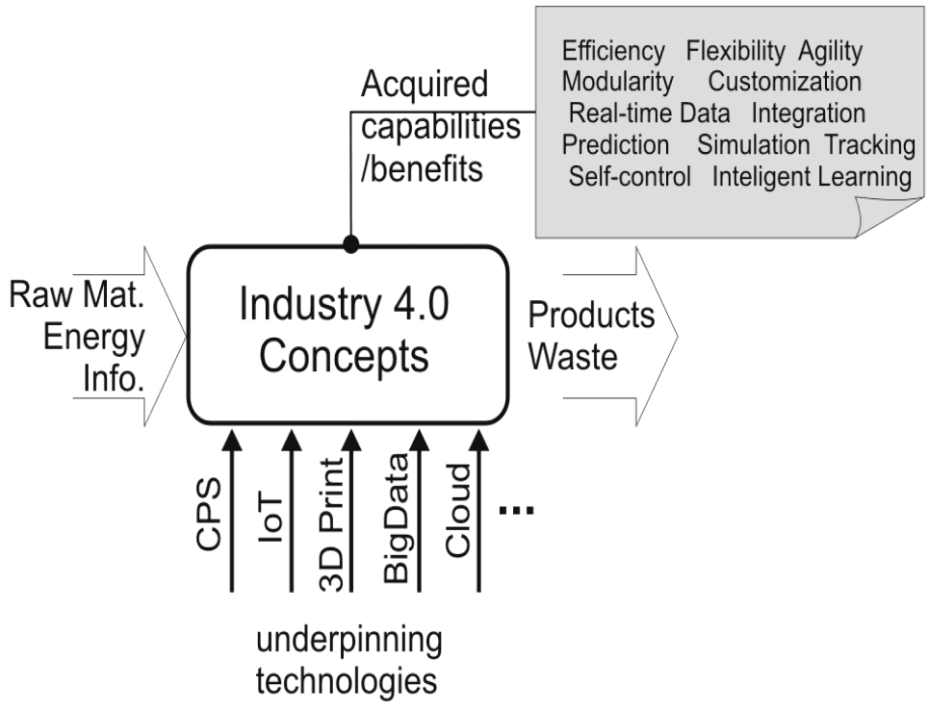

Fig. 4.1: *Schema del ciclo di produzione 4.0.*
Fonte: Bonilla et al. 2018.

4.2 Le tematiche fondamentali

In questa sezione parleremo in particolare di cinque aspetti ambientali che cambiano radicalmente in seguito all'adozione delle tecnologie 4.0 da parte delle imprese, a partire dalla questione delle emissioni di carbonio, seguita da quella dei rifiuti, poi della gestione delle risorse, della logistica, e della produzione sostenibile (Bai et al., 2020)[51].

4.2.1 Riduzione delle emissioni di carbonio attraverso l'ottimizzazione energetica

La riduzione delle emissioni di carbonio è senza dubbio uno dei benefici fondamentali che derivano dall'adozione delle tecnologie dell'Industria 4.0, la può essere raggiunta attraverso l'ottimizzazione energetica e l'integrazione di fonti energetiche rinnovabili. In particolare, rileviamo attraverso quali tecnologie 4.0 vengono a concretizzarsi questi aspetti:

1. Monitoraggio e gestione energetica

- *Sensori IoT:* l'uso di sensori IoT nei processi produttivi consente di monitorare in tempo reale il consumo energetico di macchinari e impianti; infatti, grazie ad essi si è in grado di raccogliere dati dettagliati sull'uso dell'energia, identificando le aree in cui si verificano sprechi.

- *Analisi dei Dati:* attraverso l'analisi dei Big Data le aziende possono elaborare grandi quantità di informazioni raccolte dai sensori IoT per individuare inefficienze e ottimizzare il consumo energetico: questo include la regolazione automatica delle condizioni operative per minimizzare l'uso dell'energia durante i periodi di bassa attività.

- *Sistemi di Gestione Energetica (EMS):* questi sistemi sono in grado di integrare i dati provenienti dai sensori IoT utilizzando algoritmi avanzati per gestire in modo efficiente l'energia all'interno degli stabilimenti, inoltre gli EMS possono prevedere i picchi di domanda energetica e adeguare le operazioni per evitare sprechi, ad esempio spegnendo automaticamente le apparecchiature non necessarie durante le pause.

2. Fonti energetiche rinnovabili

- *Energia solare ed eolica:* l'Industria 4.0 facilita l'integrazione delle energie rinnovabili nei processi produttivi, dato che i pannelli solari e turbine eoliche possono essere monitorati e gestiti in tempo reale per massimizzare la produzione di energia verde. Inoltre, l'analisi predittiva può ottimizzare la produzione e il consumo di energia rinnovabile in base alle condizioni meteorologiche e alla domanda energetica.

- *Microgrid e sistemi di accumulo energetico:* le microgrid, reti elettriche locali che possono operare autonomamente dalla rete principale, permettono alle aziende di gestire meglio la produzione e il consumo di energia rinnovabile. I sistemi di accumulo energetico, come le batterie avanzate, consentono di immagazzinare l'energia prodotta in eccesso per utilizzarla nei momenti di maggiore domanda o quando le fonti rinnovabili non sono disponibili (Bai et al., 2020).

[51] Bai C., Dallasega P., Orzes G., Sarkis J., 2020, Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective Chunguang, *International Journal of Production Economics*, vol. 229.

Oltre a questi aspetti possono derivare anche alcuni benefici aggiuntivi, infatti secondo Bai et al., (2020) puntando uno sguardo verso l'industria automobilistica, le nanotecnologie rappresentano l'innovazione 4.0 ottimale per migliorare la sostenibilità, visto l'enorme potenziale contributivo delle nanotecnologie allo sviluppo di plastiche e compositi leggeri a base biologica. Questo può contribuire a ridurre il consumo di carburante, le emissioni di CO2 dei veicoli e l'uso di plastiche a base di petrolio, in termini di sostenibilità economica e ambientale. Potrebbe anche migliorare le condizioni di vita degli agricoltori, portando dunque miglioramenti relativi anche alla sostenibilità sociale (World Economic Forum (WEF)Accenture, 2018)[52].

Un altro aspetto che sicuramente può migliorare è la questione sulla riduzione dei costi, che può verificarsi mediante una migliore efficienza energetica: l'ottimizzazione energetica, infatti, non solo riduce le emissioni di carbonio ma abbassa anche i costi operativi, poiché l'azienda utilizza meno energia e riduce le bollette energetiche (Ghobakhloo, 2019)[53]. Altro fattore da considerare sono sicuramente anche gli incentivi messi a disposizione dal governo**,** poiché nella realtà odierna molti governi offrono incentivi per l'adozione di tecnologie verdi, come crediti d'imposta o sussidi, che possono ridurre ulteriormente i costi di implementazione (Lin et al.,2019)[54]. Un altro vantaggio lo si può poi ottenere in termini di immagine aziendale visto che le imprese che adottano pratiche sostenibili migliorano la loro reputazione e possono attirare clienti e investitori interessati alla sostenibilità ambientale. Inoltre, l'adesione alle normative ambientali sempre più stringenti può evitare sanzioni e migliorare le relazioni con le autorità di regolamentazione.

È possibile fornire diversi esempi per dimostrare come la trasformazione digitale possa portare significativi benefici ambientali insieme a miglioramenti operativi, e uno di questi è ben rappresentato dalla nota azienda tedesca Bosch, che ha utilizzato sensori IoT per ottimizzare l'uso dell'energia nelle sue strutture con l'analisi avanzata dei dati e cloud computing, attraverso un sistema di gestione energetica basato su cloud, riuscendo a ridurre il consumo energetico del 15% e le emissioni di carbonio del 10%, migliorando al contempo l'efficienza operativa. L'approccio di Bosch include il monitoraggio in tempo reale del consumo energetico e la manutenzione predittiva, che non solo risparmia energia ma estende anche la durata delle apparecchiature[55].

Iniziative simili di aziende come Schneider Electric, che ha ottenuto una riduzione dei costi energetici grazie a una gestione più efficiente del consumo di energia e Siemens, che ha raggiunto una significativa riduzione del consumo energetico grazie all'ottimizzazione dei processi e alla manutenzione predittiva, stanno guidando l'adozione di pratiche sostenibili attraverso le tecnologie 4.0 (webbylab, Schneider Electric Blog)[56].

---

[52] World Economic Forum, 2018, *Readiness for the Future of Production Report.*

[53] Ghobakhloo M., 2020, Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, vol. 252.

[54] Lin B., Wu1 W., Song M., 2019, Industry 4.0: driving factors and impacts on firm's performance: an empirical study on China's manufacturing industry*, Annals of Operations Research*, vol. 329, pp. 47–67.

[55] https://bosch-presse.de/pressportal/de/en/bosch-combines-industry-4-0-with-ai-225414.html

[56] https://webbylab.com/blog/how-iot-can-help-with-energy-management/

Molto significativo è stato anche l'esempio della fabbrica automobilistica giapponese Panasonic, la quale ha installato pannelli solari sui tetti dei suoi stabilimenti e ha integrato un sistema di gestione energetica per ottimizzare l'uso dell'energia solare. Questo sistema include anche celle a combustibile a idrogeno e batterie di accumulo, consentendo alla fabbrica di ridurre la dipendenza dalla rete elettrica tradizionale e di abbattere le emissioni di carbonio, e i risultati ottenuti sono significativi: la struttura è in grado di essere alimentata interamente da energia rinnovabile, dimostrando la fattibilità tecnica e commerciale della produzione locale di energia pulita. Il sistema modulare consente una facile espansione, e la gestione energetica avanzata ottimizza l'uso delle diverse fonti di energia per garantire una fornitura stabile e continua, indipendentemente dalle condizioni meteorologiche (Denso, Panasonic Newsroom Global)[57].

4.2.2 Migliore gestione dei rifiuti

Secondo punto fondamentale è la riduzione degli sprechi così da favorire una gestione dei rifiuti estremamente più efficiente in modo da ottenere un loro impatto ambientale ridotto. Questo è possibile agendo sulla riduzione degli sprechi e sul riciclaggio tramite le seguenti tecnologie:

1. Riduzione degli sprechi

- *Produzione additiva:* la produzione additiva permette di realizzare componenti con estrema precisione e personalizzazione, riducendo notevolmente gli scarti di produzione. A differenza delle tecniche tradizionali che spesso richiedono l'eliminazione di materiale in eccesso (ossia la classica produzione sottrattiva), la stampa 3D costruisce gli oggetti strato per strato solo con il materiale necessario.

- *Prototipazione rapida:* grazie alla possibilità di creare prototipi rapidamente con la stampa 3D, si è in grado di ridurre il numero di versioni e modifiche necessarie, diminuendo ulteriormente gli sprechi di materiale.

- *Produzione Just-In-Time (JIT):* integrando sistemi di produzione just-in-time con le tecnologie IoT e l'analisi dei Big Data, le aziende possono produrre solo ciò che è richiesto in base alla domanda attuale, evitando surplus di produzione e sprechi, favorendo così la minimizzazione degli inventari. In aggiunta, le tecnologie avanzate permettono alle linee di produzione di essere più reattive e flessibili, adattandosi rapidamente ai cambiamenti nella domanda e riducendo in questo modo l'accumulo di materiali inutilizzati o prodotti invenduti.

2. Riciclaggio e riutilizzo

- *Tecnologie di smistamento automatizzato:* l'uso di sistemi di visione artificiale e robotica per lo smistamento dei rifiuti è molto importante, perché permette di separare efficacemente materiali riciclabili da quelli non riciclabili. Questi sistemi difatti possono identificare e classificare materiali con alta precisione, migliorando l'efficienza del riciclaggio.

[57] https://www.denso.com/global/en/news/newsroom/2023/20230518_g04/

I robot più avanzati possono poi essere programmati per eseguire il lavoro di smistamento in modo più rapido e accurato rispetto agli operatori umani, aumentando i tassi di riciclaggio e riducendo i costi operativi, oltre al fattore di errore appunto umano.

- *Economia circolare:* le tecnologie avanzate possono permettere anche il recupero di materiali preziosi dai rifiuti di produzione. Ad esempio, i metalli preziosi possono essere estratti dai rifiuti elettronici, riducendo la necessità di estrazione di nuove materie prime. Inoltre, attraverso la progettazione assistita da computer (CAD) permettono di progettare prodotti pensando al loro intero ciclo di vita, facilitando il disassemblaggio e il recupero dei materiali a fine vita (Ghobakhloo, 2019).

I vantaggi economici che derivano da tali implementazioni 4.0 possono essere riassunti dunque principalmente in due voci:

- Risparmio sui costi: visto che il recupero di materiali preziosi dai rifiuti e la riduzione degli sprechi possono tradursi in significativi risparmi sui costi per le aziende. Inoltre, le tecnologie avanzate di smistamento e riciclaggio possono ridurre i costi operativi associati alla gestione dei rifiuti.
- Incentivi e conformità: come già detto prima, molti governi offrono incentivi fiscali e sussidi per le aziende che adottano pratiche sostenibili di gestione dei rifiuti, e l'adozione di tecnologie verdi può aiutare le aziende a conformarsi alle normative ambientali, che con il passare degli anni sono sempre più rigide vista la notevole criticità di equilibrio ambientale che il nostro pianeta sta attualmente attraversando (Lin et al. ,2019).

Ovviamente oltre a questi, si aggiungono ulteriori benefici anche per quanto riguarda la sostenibilità ambientale, primo fra tutti la riduzione dei volumi delle discariche, poiché migliorando il riciclaggio e riducendo gli sprechi, le aziende contribuiscono a ridurre la quantità di rifiuti che finiscono in esse, diminuendo quindi il loro impatto ambientale negativo. Inoltre, riducendo la necessità di estrarre e lavorare nuove materie prime, le tecnologie di riciclaggio aiutano a diminuire le emissioni di gas serra legate ai processi industriali tradizionali (Bai et al., 2020).

Anche per quanto concerne la gestione dei rifiuti vi sono diversi casi ed esempi di alcune aziende, come Remeo, una compagnia finlandese che opera proprio in questo settore, la cui fabbrica di componenti elettronici ha implementato un sistema di smistamento automatizzato basato su visione artificiale e robotica. Questo sistema ha permesso di aumentare il tasso di recupero dei materiali riciclabili del 25%, riducendo al contempo i costi operativi del 15% (RecyclingInside, Automate)[58]. Un altro caso lo possiamo riscontrare nella nota multinazionale tedesca BMW, la quale ha adottato la stampa 3D per la produzione di parti di ricambio, che ha permesso di ridurre gli sprechi di materiale del 30% e ha diminuito i tempi di produzione, consentendo all'azienda di rispondere più rapidamente alle richieste dei clienti (3D Printing Industry)[59]. In figura 4.2 viene riportato lo schema dei diversi impatti di I4.0 che si riversano sull'ambiente.

[58] https://recyclinginside.com/recycling-technology/separation-and-sorting-technology/zenrobotics-ai-based-robotic-waste-sorting-technologies-help-remeo-to-build-the-next-generation-materials-recovery-facility/

[59] https://3dprintingindustry.com/news/mclaren-goes-beyond-prototyping-to-hit-new-f1-part-milestone-with-stratasys-3d-printing-214469

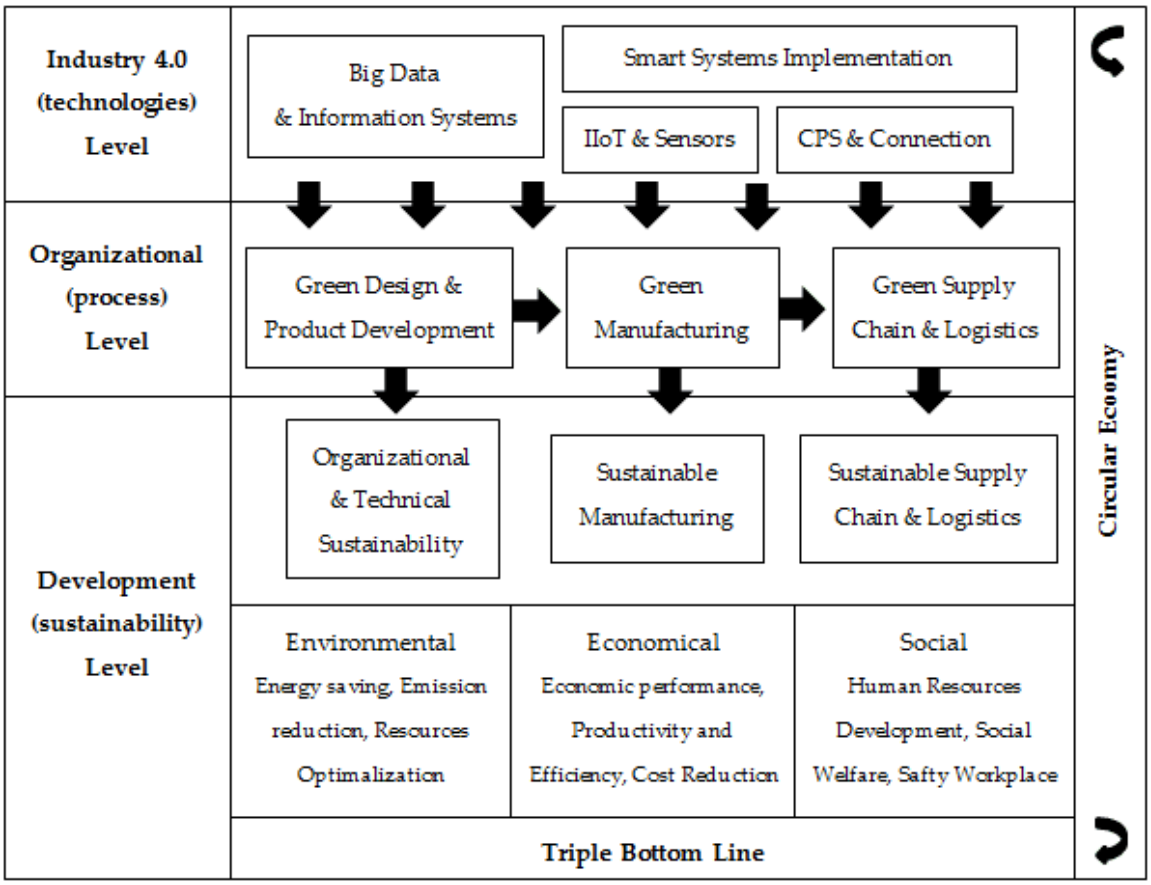

Fig. 4.2: *Le varie influenze sul livello ambientale dell'Industria 4.0.*
Fonte: Vrchota et al., 2020.

4.2.3 Efficienza migliore delle risorse attraverso il loro uso sostenibile

L'Industria 4.0 fornisce inoltre un ampio arsenale di tecnologie avanzate che permettono alle imprese di ottimizzare l'uso delle risorse in modo più efficiente ed ecologico, un elemento cardine per il miglioramento delle condizioni ambientali, e questo include la gestione intelligente delle risorse idriche, l'ottimizzazione dei materiali e la gestione integrata della catena di approvvigionamento. Di seguito vengono illustrate le tecnologie 4.0 legate a tali impieghi:

1. Gestione intelligente delle risorse idriche

- *Monitoraggio e analisi in tempo reale dell'acqua:* grazie alla multi-versatilità dei sensori IoT, essi possono anche essere installati nei sistemi di approvvigionamento e trattamento delle acque per monitorarne in maniera continua la qualità e la quantità. Così facendo i sensori sono in grado di raccogliere sistematicamente dati su parametri come il pH, la temperatura, i livelli di contaminanti e il flusso d'acqua. In più, grazie alla possibilità di avvalersi dell'analisi dei Big Data, si possono elaborare le informazioni raccolte dai sensori IoT per identificare sprechi, perdite e inefficienze. Questo consente dunque una gestione proattiva delle risorse idriche, prevedendo diversi problemi prima che essi si verifichino.

- *Sistemi di irrigazione intelligente:* l'uso di sistemi di irrigazione intelligenti basati su dati meteorologici e analisi del suolo consente di fornire l'esatta quantità di acqua necessaria alle colture, riducendo in questo modo gli sprechi e migliorando l'efficienza idrica.

Trovano largo impiego anche sistemi di irrigazione automatizzati che possono essere programmati per attivarsi solo quando necessario, basandosi su dati in tempo reale e previsioni meteorologiche, ottimizzando così l'uso dell'acqua. (Zulkifli et al., 2019)[60].

2. Ottimizzazione dei materiali

- *Progettazione CAD:* l'uso di software CAD permette di progettare prodotti in modo da minimizzare l'utilizzo e dunque lo spreco dei materiali. Ciò comporta la riduzione del peso dei componenti, l'uso di materiali riciclabili e la progettazione per il disassemblaggio, facilitando il recupero e il riutilizzo dei materiali a fine vita. Inoltre, grazie alla possibilità di effettuare simulazioni virtuali, si è in grado di testare i prodotti in ambienti digitali, riducendo la necessità di prototipi fisici e quindi di sprechi di materiale, ma non solo: grazie al fatto di poter simulare ed effettuare modifiche rapide sui componenti e le loro prestazioni si risparmia un notevole quantitativo di tempo, riducendo inoltre eventuali problemi che emergerebbero a valle della produzione, la cui correzione potrebbe avere un impatto sull'ambiente più o meno elevato.

- *Additive Manufacturing:* la stampa 3D permette di creare componenti con precisione millimetrica, utilizzando solo il materiale necessario e riducendo significativamente gli scarti di produzione rispetto alle tecniche tradizionali di produzione sottrattiva. Come vantaggio ulteriore, la possibilità di produrre parti e componenti su richiesta riduce la necessità di mantenere grandi scorte di magazzino, diminuendo l'uso dei materiali e gli sprechi associati a prodotti obsoleti o inutilizzati, aspetto assolutamente non banale.

3. Gestione integrata della catena di approvvigionamento

- *Tracciabilità e trasparenza (Blockchain):* la tecnologia blockchain può essere utilizzata per tracciare ogni fase della catena di approvvigionamento, garantendo la trasparenza e l'affidabilità delle informazioni sui materiali e i prodotti. Questo aiuta a identificare e ridurre le inefficienze, migliorando al contempo la gestione delle risorse. Come opzione ulteriore vi sono anche i cosiddetti sensori ed etichette RFID (Radio-Frequency Identification), che possono monitorare in tempo reale la posizione e lo stato dei materiali lungo la catena di approvvigionamento, portando anche in questo caso ad una visibilità e gestione delle risorse maggiormente efficaci.

- *Ottimizzazione della logistica:* l'uso di algoritmi avanzati e intelligenza artificiale permette di ottimizzare i percorsi di trasporto, riducendo i tempi di consegna, i costi e le emissioni di carbonio. Questo contribuisce non solo a una gestione più efficiente delle risorse logistiche, ma grazie all'analisi predittiva si è in grado di prevedere più facilmente la domanda dei clienti e di pianificare in anticipo la produzione e l'approvvigionamento delle materie prime, riducendo gli sprechi e migliorando l'efficienza operativa (Li et al., 2020).

Attraverso, dunque, una gestione sostenibile delle risorse si ottengono numerosi e consistenti benefici per quanto riguarda la sostenibilità ambientale, poiché ciò porta alla conservazione delle risorse naturali. Infatti, l'ottimizzazione dell'uso delle risorse riduce la pressione su tali risorse, contribuendo alla conservazione degli ecosistemi e della biodiversità (World Economic Forum (WEF)Accenture,

[60] Zulkifli C.Z., Noor N.M. and Abu Hassan N.H., 2019, Performance Evaluation of Integrated Moisture with ZigBee Mesh Network for Automated Irrigation System, *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*.

2018). In aggiunta grazie a questo possiamo collegarci anche alla riduzione delle emissioni, dato che la riduzione degli sprechi e l'uso più efficiente delle risorse diminuisce le emissioni di gas serra e altri inquinanti, migliorando la qualità dell'aria e dell'acqua (Zulkifli et al., 2019). Anche in ambito economico possiamo riscontrare miglioramenti, poiché l'uso ottimizzato delle risorse riduce i costi operativi, aumentando la redditività delle aziende. Questo include risparmi sui costi di approvvigionamento, produzione e gestione dei rifiuti. Infine, anche parlando in termini di competitività, le aziende che adottano pratiche sostenibili e ottimizzate possono differenziarsi dai concorrenti e attrarre clienti e investitori interessati alla sostenibilità (Bai et al., 2020).

Per citare anche in questo caso qualche esempio, Veolia (Francia) e Libelium (Spagna), due aziende leader nel settore delle tecnologie avanzate per la gestione sostenibile delle risorse idriche, hanno implementato un sistema di monitoraggio IoT per gestire l'uso dell'acqua nei loro processi di produzione. Utilizzando sensori IoT e l'Analisi dei Dati, entrambe le imprese sono riuscite a ridurre il consumo di acqua del 20% e a migliorare la qualità delle acque reflue trattate (Libelium)[61].

Un altro case study interessante è quello rappresentato da HP, una fabbrica di elettronica californiana, che ha adottato la stampa 3D per produrre componenti su misura, riducendo gli sprechi di materiale del 30% e migliorando l'efficienza della produzione (Libelium). Anche Siemens ha implementato il sistema di additive manufacturing nelle sue operazioni di produzione, consentendo la creazione di componenti complessi, sempre su misura e altamente personalizzabili, riducendo i tempi di produzione e contenendo gli sprechi di risorse. Entrambe le aziende inoltre utilizzano software CAD per migliorare il design dei prodotti, facilitando così il riciclaggio e il riutilizzo dei materiali, contribuendo così a una produzione più sostenibile. In particolare poi Siemens ha investito in una struttura all'avanguardia per la stampa 3D nel Regno Unito, ampliando le capacità di produzione e integrando una catena digitale end-to-end per supportare la produzione in serie (siemens.com Global Website)[62].

4.2.4 Miglioramento della logistica

Come già anticipato, l'Industria 4.0 ha un impatto significativo sull'ottimizzazione della logistica e dei trasporti, dato che anche in questo ambito tecnologie avanzate come IoT, i sistemi di gestione avanzata del magazzino (WMS), i veicoli a guida autonoma e l'analisi dei Big Data, possono essere sfruttati per ottenere grandi miglioramenti in tali ambiti.

Queste innovazioni consentono una gestione più efficiente delle catene di approvvigionamento, riducendo il consumo di carburante, le emissioni di CO2 e i costi operativi. Si descrivono più nel dettaglio le voci suddette:

[61] https://www.libelium.com/iot-solutions/smart-water/

[62] https://www.siemens.com/global/en/company/stories/industry/am-additivemanufacturing-3dprinting-textile-eos-dyemansion.html

1. Monitoraggio e tracciamento in tempo reale

- *Tracciamento e monitoraggio dei veicoli:* i sensori IoT installati sui veicoli permettono di monitorare in tempo reale la posizione, la velocità e il consumo di carburante dei veicoli. Questo, di conseguenza, consente di ottimizzare i percorsi di consegna, riducendo il consumo di carburante e le emissioni di CO2. In aggiunta, i dati raccolti dai sensori IoT permettono una gestione più efficiente delle flotte, riducendo i tempi di inattività e migliorando la manutenzione preventiva dei veicoli, evitando guasti e consumi energetici non necessari.

- *Smart Warehouse:* i magazzini intelligenti utilizzano sensori e sistemi di gestione avanzati per ottimizzare lo spazio di stoccaggio, riducendo i tempi di movimentazione e il consumo energetico; infatti, questi sistemi possono anche automatizzare l'inventario, migliorando l'efficienza operativa.

2. Pianificazione e ottimizzazione dei percorsi

- *Sistemi di gestione del trasporto (TMS):* i TMS utilizzano algoritmi avanzati e dati in tempo reale per ottimizzare i percorsi di consegna, riducendo il consumo di carburante e le emissioni. Questi sistemi considerano variabili come il traffico, le condizioni stradali e le finestre di consegna per creare percorsi efficienti, aggiornandosi in tempo reale. Inoltre, essi aiutano a pianificare il carico ottimale dei veicoli, riducendo i viaggi a vuoto e migliorando l'efficienza del trasporto.

- *Analisi dei Big Data:* l'analisi dei big data permette di prevedere con precisione la domanda futura, ottimizzando le operazioni logistiche per evitare sprechi e ridurre i costi energetici. Essi aiutano anche a monitorare le prestazioni dei trasporti e a identificare aree di miglioramento, ottimizzando l'uso delle risorse e riducendo l'impatto ambientale (Bai et al., 2020).

3. Automazione e veicoli a guida autonoma

- *Robotica e automazione:* l'uso di robot nei magazzini aumenta di moltissimo il loro grado di automazione; infatti, essi contribuiscono notevolmente a ridurre il consumo energetico, ottimizzando le operazioni di picking e stoccaggio, soprattutto perché possono lavorare 24/7 senza bisogno di pause, migliorando così l'efficienza operativa. In più grazie ad essi l'automazione si estende anche nei processi logistici, come il carico e lo scarico dei camion, garantendo così una riduzione dei tempi di movimentazione e il consumo energetico, e azzerando praticamente i rischi sul lavoro così come il fattore di errore umano.

- *Veicoli a guida autonoma:* i veicoli a guida autonoma possono ottimizzare la velocità e il consumo di carburante grazie a una guida più precisa e prevedibile, riducendo le emissioni di CO2. Inoltre, grazie alla possibilità dei robot autonomi di operare durante la notte si riduce il traffico, migliorando dunque l'efficienza delle consegne (Birkel e Muller, 2021)[63].

4. Sostenibilità e riduzione delle emissioni

- *Carburanti alternativi:* l'adozione di veicoli elettrici e ibridi nella logistica riduce significativamente le emissioni di CO2 e il consumo di carburante fossile, visto che questi veicoli sono particolarmente adatti per le consegne urbane, dove la densità di traffico e le distanze relativamente brevi favoriscono

[63] Birkel H., Müller J.M., 2021, Potentials of industry 4.0 for supply chain management within the triple bottom line of sustainability–A systematic literature review, *Journal of Cleaner Production*, vol. 289.

l'uso di motori elettrici. Anche l'uso di carburanti alternativi, come il biodiesel e il gas naturale compresso (CNG), contribuisce a ridurre l'impatto ambientale dei trasporti.

- *Packaging sostenibile:* l'industria logistica sta adottando imballaggi realizzati con materiali riciclati e biodegradabili, riducendo i rifiuti e l'impatto ambientale. In aggiunta, l'ottimizzazione delle dimensioni e del peso degli imballaggi riduce il consumo energetico durante il trasporto e lo stoccaggio (Li et al., 2020).

Anche in questo caso possiamo riscontrare una serie di ulteriori vantaggi derivanti dall'adozione di queste scelte che vanno ad impattare positivamente sulle prestazioni aziendali, soprattutto si rileva una riduzione dei costi operativi grazie ad una maggiore efficienza di gestione del carburante: l'ottimizzazione dei percorsi e l'uso di veicoli di ultima generazione, infatti, ne diminuiscono il consumo, abbassando i costi operativi delle aziende di logistica, inoltre l'ottimizzazione dei trasporti e l'uso di veicoli a basse emissioni contribuiscono a ridurre l'impatto ambientale delle operazioni logistiche.
A questo si aggiunge anche la possibilità di effettuare la manutenzione predittiva dei veicoli e delle attrezzature di interesse, che contribuiscono a contenere le spese di riparazione e i tempi di inattività, migliorando l'efficienza operativa. Inoltre, secondo Bai et al., (2020), soprattutto nei settori automobilistico ed elettronico i robot autonomi e i sistemi cobotici sembrano avere un impatto molto elevato, poiché possono supportare la produzione di componenti elettronici in modo efficiente dal punto di vista energetico e delle risorse. Ciò può essere vero soprattutto per la fabbricazione di wafer di silicio e di microchip, soprattutto nei mercati emergenti dove esiste un potenziale significativo di aumento dell'efficienza (World Economic Forum (WEF) Accenture, 2018). Tuttavia, i robot autonomi sembrano avere poca influenza per aumentare la sostenibilità ambientale in altre tipologie industriali, come ad esempio quella alimentare e delle bevande, e questo può essere spiegato considerando che tale settore può essere classificato come un'industria di processo, generalmente caratterizzata da un elevato grado di automazione e da un flusso produttivo continuo. Infine, anche il campo della sicurezza può beneficiare moltissimo dall'implementazione di queste tecnologie 4.0, soprattutto per via della facoltà di eseguire un monitoraggio in tempo reale dei veicoli e delle operazioni logistiche, che di conseguenza aumenta la sicurezza stradale, riducendo il rischio di incidenti e guasti. Come ulteriore aspetto assolutamente da non sottovalutare, visto che l'automazione dei processi logistici riduce l'intervento umano in operazioni pericolose, questo garantirà una maggiore dei lavoratori.

Per concludere, in questa sezione come casi studio si cita DHL, un'azienda di logistica internazionale che ha implementato il TMS nella gestione della propria catena logistica, utilizzando quindi la condivisione e analisi dei dati in tempo reale per ottimizzare i percorsi di consegna e ridurre il consumo di carburante. Grazie a questa tecnologia, l'azienda è riuscita a ridurre le emissioni di CO2 del 20% e i costi operativi del 15% (TMCnet)[64]. Anche UPS, azienda georgiana multinazionale di logistica e consegne ha seguito lo stesso esempio, ottenendo delle riduzioni significative delle emissioni di CO2 e miglioramenti nell'efficienza operativa (National Academies Press)[65].

[64] https://www.tmcnet.com/topics/articles/2023/04/11/455541-impact-transportation-management-systems-route-optimization-fuel-efficiency.htm

[65] https://nap.nationalacademies.org/read/22383/chapter/5

Portando un ulteriore esempio di caso studio, citiamo la più che nota Amazon, che in molti dei suoi magazzini ha adottato robot per la gestione delle operazioni di picking e stoccaggio, migliorando l'efficienza energetica e riducendo i tempi di movimentazione. Tale implementazione ha portato a una riduzione del consumo energetico del 25% e a un miglioramento dell'efficienza operativa del 30% (Us About Amazon)[66].

4.2.5 Impatti ecologici positivi grazie ad una produzione più sostenibile

Come abbiamo visto l'integrazione di tecnologie avanzate permette di sviluppare processi produttivi più puliti, che riducono l'impatto ambientale complessivo, ma oltre a questo può consentire di progettare prodotti con una maggiore considerazione per il loro impatto ambientale lungo tutto il ciclo di vita, favorendo l'uso di materiali riciclabili e la riduzione dei consumi energetici. Anche in questo caso esaminiamo i miglioramenti che l'industria 4.0 può portare attraverso le sue tecnologie:

1. Processi di produzione verde

- *Riduzione dei rifiuti e dell'inquinamento:* grazie alla produzione additiva si può realizzare una produzione di parti e componenti con un utilizzo preciso dei materiali, riducendo notevolmente i rifiuti rispetto ai processi di produzione tradizionali. In più l'implementazione di sistemi di produzione a ciclo chiuso permette di riciclare e riutilizzare i materiali all'interno del ciclo produttivo, minimizzando gli scarti e riducendo l'impatto ambientale.

- *Efficienza energetica:* come abbiamo visto l'uso di macchine intelligenti e robotica avanzata permette di ottimizzare i processi produttivi, riducendo il consumo energetico grazie a una maggiore precisione e a una migliore gestione delle risorse. In particolare, l'adozione di sistemi di gestione dell'energia basati sull'IoT consente di monitorare e ottimizzare il consumo energetico in tempo reale, identificando e correggendo inefficienze.

- *Uso di fonti energetiche rinnovabili:* molti impianti produttivi stanno integrando fonti di energia rinnovabile come solare ed eolica per alimentare le loro operazioni, riducendo la dipendenza dai combustibili fossili e le emissioni di gas serra, e attraverso le micro-reti e i sistemi di accumulo dell'energia si possono immagazzinare grandi quantità dell'energia rinnovabile generata e utilizzarla nei momenti di picco della domanda, migliorando l'efficienza energetica complessiva dell'impianto produttivo (Shou et al., 2018).

2. Progettazione Ecologica

- *Analisi del Ciclo di Vita (LCA):* l'analisi del ciclo di vita è un metodo che valuta l'impatto ambientale di un prodotto lungo tutto il suo ciclo di vita, dalla produzione alla dismissione. Utilizzando software avanzati, le aziende possono identificare le fasi del ciclo di vita con il maggiore impatto ambientale e ottimizzare i processi per ridurlo. Inoltre, la LCA aiuta le aziende a scegliere materiali più sostenibili, promuovendo l'uso di materiali riciclati o a basso impatto ambientale.

[66] https://www.aboutamazon.com/news/sustainability/what-is-the-climate-pledge

- *Progettazione per il riciclo e il disassemblaggio:* la progettazione per il riciclo implica la creazione di prodotti che possano essere facilmente riciclati alla fine del loro ciclo di vita, e ciò include l'uso di materiali che possono essere separati e riutilizzati con facilità. Tale pratica è nota come Design for Recycling (DfR), e in concomitanza ad essa vi è anche il Design for Disassembly (DfD): questa metodologia invece si concentra sulla progettazione di prodotti che possano essere facilmente smontati, facilitando la riparazione, la manutenzione e il riciclo dei componenti.

- *Ottimizzazione del consumo energetico:* l'adozione e l'utilizzo di strumenti di simulazione e modellazione digitale permette di ottimizzare i progetti dei prodotti per minimizzare il consumo energetico durante l'uso.

A titolo di esempio, le simulazioni possono identificare aree di miglioramento nell'aerodinamica di un veicolo per ridurre il consumo di carburante, o ancora, attraverso la modellazione e la simulazione di linee di produzione, le aziende possono identificare colli di bottiglia, ottimizzare il flusso di materiali e migliorare l'efficienza operativa complessiva. Come esempio specifico interessante si segnala l'uso di gemelli digitali (digital twins) nella produzione di semiconduttori. Tali simulazioni aiutano a prevedere il comportamento delle macchine e dei sistemi in diverse condizioni operative, consentendo agli ingegneri di ottimizzare i parametri di processo per migliorare la qualità del prodotto finale e ridurre gli scarti. Questo tipo di simulazione permette di testare diverse configurazioni e strategie senza interrompere la produzione reale, risparmiando tempo e costi e riducendo i rischi associati alle modifiche operative.

Infine, abbiamo anche la progettazione di prodotti leggeri, che si concretizza utilizzando materiali avanzati come leghe metalliche leggere o compositi, permettendo così di ridurre il consumo energetico necessario per il trasporto e l'uso dei prodotti (Ghobakhloo, 2019).
Si evidenzia inoltre come in seguito all'adozione dei pacchetti Industry 4.0 in tale ambito derivano anche vantaggi di stampo economico, visto che i processi produttivi introdotti riducono gli sprechi di materiali, abbassando i costi operativi, ed essendo più efficienti anche in termini energetici anche i costi corrispondenti subiscono una diminuzione, migliorando la redditività complessiva dell'azienda.
Anche in questo caso la conformità alle normative ambientali permette alle aziende che adottano processi di produzione verde e progettazione ecologica di essere più preparate a conformarsi ai regolamenti ambientali, evitando multe e migliorando la loro immagine (Lin et al., 2019).
Possiamo affermare in aggiunta che le aziende che dimostrano un forte impegno verso la sostenibilità ambientale guadagnano la fiducia dei clienti e innalzano la loro reputazione sul mercato, ma non solo: l'adozione delle tecnologie Smart Factory e sostenibili, infatti, può posizionare le aziende come leader di mercato, stimolando l'innovazione e attirando investimenti (Li et al., 2020).

Infine, per quanto concerne i casi studio, si riporta come esempio ancora una volta BMW, la quale, avvalendosi della stampa 3D, produce componenti leggeri con geometrie complesse che riducono il peso del veicolo. Questo comporta non solo il consumo di materiali, ma in seguito alla completa integrazione dell'Industry 4.0 nei suoi processi, ha anche migliorato l'efficienza del carburante del veicolo, riducendo inoltre le emissioni di CO2 (3D Printing Industry).

Altro case study degno di menzione è quello della Apple, che è una delle grandi aziende che ha implementato una strategia di Life Cycle Assessment per valutare e ridurre l'impatto ambientale dei suoi prodotti durante tutto il ciclo di vita, dalla produzione all'uso e allo smaltimento.

Questo approccio consente ad Apple di identificare le aree in cui può migliorare la sostenibilità e ridurre l'impronta ecologica dei suoi dispositivi: infatti, grazie al design for disassembly, Apple è in grado di recuperare materiali preziosi dai dispositivi dismessi, riducendo i rifiuti elettronici e il bisogno di estrarre nuove risorse.

Come abbiamo visto, tali iniziative di riciclo e il design per il disassemblaggio contribuiscono a ridurre la quantità di rifiuti elettronici che finiscono nelle discariche, e inoltre ciò comporta un impatto ambientale ridotto: utilizzando l'LCA , Apple è difatti in grado di ridurre l'impatto ambientale dei suoi prodotti, (figura 4.3), migliorando la sostenibilità complessiva della produzione e del consumo (Apple Environmental Progress Report FY20 & FY21)[67].

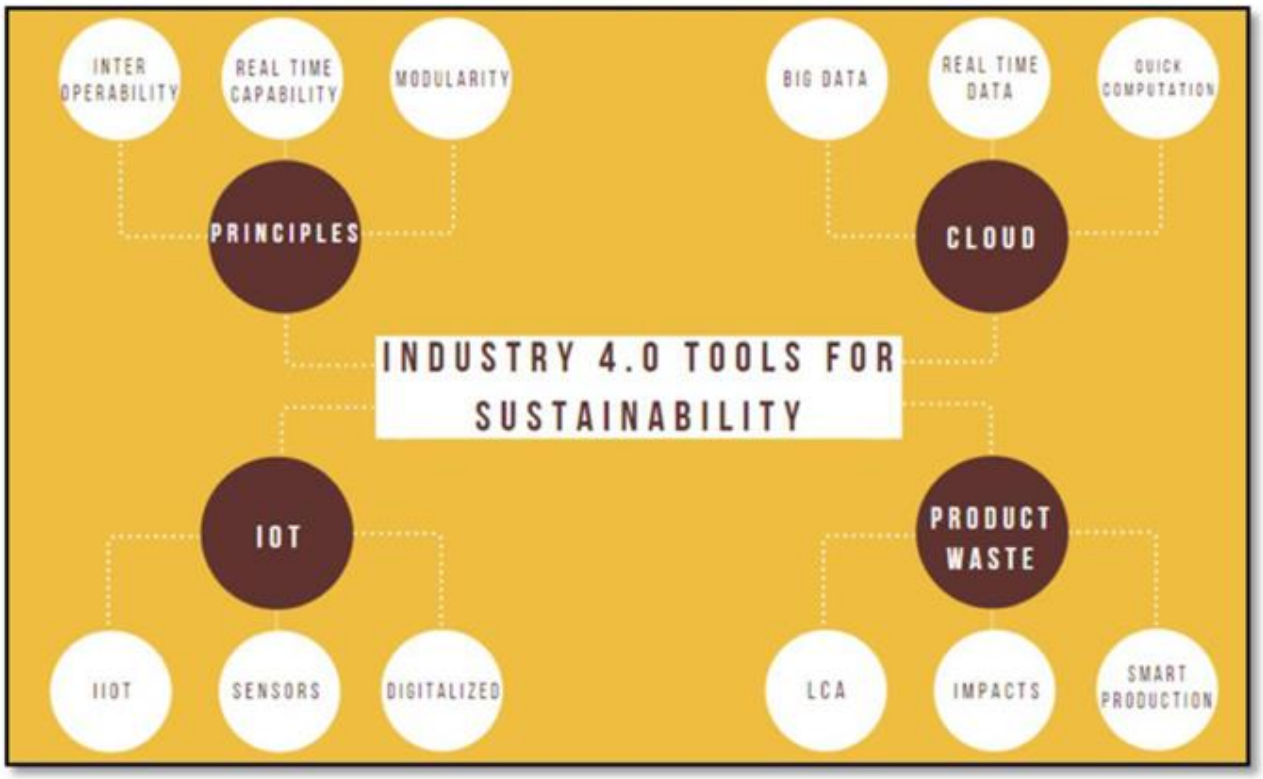

Fig. 4.3: *Strumenti specifici dell'Industria 4.0 per l'implementazione di un'etica sostenibile. Fonte: Javaid et al., 2020.*

4.3 Sfide e considerazioni

Abbiamo visto come l'evoluzione verso l'Industria 4.0 comporta numerosi benefici ambientali, ma ovviamente non bisogna dimenticare che non esiste nessuna rivoluzione, per di più industriale, che presenti solamente vantaggi. Difatti, anche l'Industry 4.0 non è certo esente da questa realtà, poiché anch'essa porta con sé alcune sfide e considerazioni importanti che devono essere affrontate per garantire una transizione sostenibile.

[67] https://www.apple.com/environment/pdf/Apple_CCF_Assurance_Statement_FY2020.pdf

4.3.1 Danni indiretti all'ambiente

Alcuni studi hanno evidenziato possibili effetti negativi non desiderati delle tecnologie I4.0 sulla sostenibilità ambientale e anche sociale (Bohnsack et al., 2022[68]; Dieste et al., 2023[69]; Ghobakhloo et al., 2021), sostenendo per giunta che la letteratura è generalmente eccessivamente ottimista per quanto riguarda gli impatti economici e socio-ambientali di I4.0,

e in particolare che la produzione completamente automatizzata potrebbe portare a un maggiore consumo di risorse primarie (Stock et al., 2018)[70]; che la blockchain o il cloud computing applicati alla produzione e alla gestione della catena di fornitura potrebbero portare a maggiori consumi energetici (Singh e Bhanot, 2020)[71]. Oltre a questo, l'innovazione 4.0 potrebbe causare la perdita di autonomia dei dipendenti a causa della continua condivisione dei dati (Cirillo et al., 2021)[72].

Tuttavia, sebbene esistano già alcune prove impegnative di conoscenza consolidata su I4.0 e sostenibilità, nessuno studio precedente nella letteratura ha messo in discussione fondamentalmente i presupposti principali. A tal proposito, citiamo lo studio di Dieste et. al, 2023, che esplora approfonditamente la letteratura e consulta diversi esperti per analizzare i potenziali impatti non intenzionali (ovvero quelli causati indirettamente) sulla sostenibilità di I4.0.
Oltre a ciò mira a formulare e valutare ipotesi alternative che possano potenzialmente sviluppare nuove proposte di ricerca riguardanti gli impatti sulla sostenibilità portata dalle tecnologie smart factory, dapprima conducendo una revisione completa della letteratura sugli esiti negativi della sostenibilità delle tecnologie I4.0, per poi condurre uno studio Delphi che ha coinvolto 43 esperti internazionali per valutare le ipotesi alternative, discutendo la probabilità che si verifichino nei prossimi cinque anni e la gravità di ciascun effetto negativo non intenzionale I4.0, ed è poi stato chiesto di illustrare i meccanismi alla base di ciascun impatto negativo e di proporre azioni di mitigazione a livello di azienda, catena di fornitura e politica. Gli autori discutono della sostituzione dei lavoratori con le nuove tecnologie digitali e della sfida per i dipendenti di trovare il proprio equilibrio in questa realtà travolgente. Allo stesso modo, Bai et al. (2020), discutono i potenziali problemi etici, di privacy e di autonomia associati alla condivisione dei dati nel cloud. Secondo gli autori, inoltre, varie implicazioni sociali di dell'Industria 4.0 sono state sottovalutate.

---

[68] Bohnsack R., Bidmon C.M. and Pinkse J.,2022, *Sustainability in the digital age: Intended unintended consequences of digital technologies for sustainable development*. Business Strategy and the Environment, vol. 31, pp. 599-602.

[69] Dieste M., Orzes G., Culot G., Sartor M. and Nassimbeni G., 2023, The "dark side" of Industry 4.0: How can technology be made more sustainable?, *International Journal of Operations& Production Management. Emerald Publishing Limited*, vol. 44., n. 5.

[70] Stock T., Obenaus M., Kunz S. and Kohl H., 2018, Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: a qualitative assessment of its ecological and social potential, *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 118, pp. 254-267.

[71] Singh R. and Bhanot N., 2020, An integrated DEMATEL-MMDE-ISM based approach for analysing the barriers of IoT implementation in the manufacturing industry*, International Journal of Production Research*, vol. 58, n. 8, pp. 2454-2476.

[72] Cirillo V., Rinaldini M., Staccioli J. and Virgillito M.E., 2021, *Technology vs workers: the case of Italy's industry 4.0 factories*, Structural Change and Economic Dynamics, vol. 56, pp. 166-183.

In primo luogo, viene riportato come la connettività e l'elaborazione dei dati a seguito dell'adozione delle tecnologie 4.0 nella produzione e nella gestione della catena di fornitura (ad es analisi dei dati, intelligenza artificiale, cloud computing, robot autonomi e blockchain) portano a livelli più elevati di consumo di energia (Stock et al., 2018), constatando che le sfide ecologiche possono apparire a causa dell'aumento di energia utilizzati dalla generazione e dallo scambio di dati. Singh e Bhanot (2020) suggeriscono che se molti dispositivi comunicano tra loro (generando quindi grandi quantità di dati che possono sopraffare le infrastrutture informatiche), portano a un maggiore consumo energetico, e allo stesso modo anche la blockchain è caratterizzata da un elevato consumo di energia. In secondo luogo, l'adozione delle tecnologie I4.0 (ad esempio robot, CPS, IoT e dispositivi di produzione additiva) implica l'obsolescenza e la sostituzione dei dispositivi precedenti, aumentando lo spreco di materiale, che, in alcuni casi, possono essere rifiuti pericolosi. Muller et al. (2018) sottolineano che l'adozione delle tecnologie 4.0 comporta spesso la necessità di sostituire interi processi produttivi, e come è certamente noto, infatti, è difficile e complesso aggiornare singole macchine con diversi gradi di automazione e in diverse fasi di vita, oltre a sostenere non solo gli elevati costi di smantellamento dei dispositivi obsoleti, ma anche i costi necessari per sostituire le apparecchiature nella stessa condizione. Ciò potrebbe essere addirittura insostenibile, poiché la maggior parte dei vecchi macchinari deve essere smaltita e spedita in discarica.

In terzo luogo, l'hardware necessario per l'implementazione di I4.0 (ad esempio sensori, chip, infrastrutture di connettività) richiede un consumo maggiore di risorse naturali (metalli, acqua, energia) rispetto alle tecnologie di produzione tradizionali (Birkel et al., 2019), dato che le tecnologie I4.0 richiedono grandi quantità di materie prime critiche utilizzate per RFID, sensori, display, semiconduttori e raccolta di microenergia. Gli esperti ritengono tra l'altro e non a caso che le risorse naturali rare siano sempre più necessarie nelle attività e nei prodotti. In quarto luogo, diversi studi sottolineano che la produzione additiva porta a un consumo energetico più elevato rispetto ai processi di produzione tradizionali, come riporta Yoon et al (2014)[73]; ma allo stesso modo, Ford e Despeisse (2016)[74] sostengono che, sebbene l'AM sia ad alta intensità energetica per unità prodotta, offre livelli più elevati di personalizzazione e un minore utilizzo di materiale, anche se Stock et al (2018) indicano che, a causa dell'uso frequente di tecnologie laser per sinterizzare il materiale, i processi AM sono ancora inefficienti dal punto di vista energetico.

4.3.2 Consumi e sprechi

Oltre alle problematiche citate si devono considerare anche:

- *Impatto negativo dei rifiuti elettronici:* l'adozione massiccia di tecnologie digitali porta inevitabilmente ad un aumento della produzione di rifiuti elettronici, noti come e-waste. Questi rifiuti possono essere invero problematici, dato che contengono componenti e materiali potenzialmente dannosi per l'ambiente e la salute umana, come metalli pesanti e sostanze chimiche tossiche. Inoltre,

[73] Yoon H.-S., Lee J.-Y., Kim H.-S., Kim M.-S., Kim E.-S., Shin Y.-J., Chu W.-S. and Ahn S.-H., 2014, A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: review and case study, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green,* vol. 1, n. 3, pp. 261–279.

[74] Ford S. and Despeisse M., 2016, Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, *Journal of Cleaner Production,* vol. 137, pp. 1573-1587.

se non gestiti correttamente, gli e-waste possono causare di conseguenza un inquinamento del suolo, dell'acqua e dell'aria, oltre a rappresentare una minaccia per la biodiversità e la catena alimentare. Inoltre, il ciclo di vita più breve dei nuovi dispositivi, la mancanza di compatibilità e le limitate opzioni di rinnovamento delle vecchie apparecchiature sono tra le ragioni principali dell'aumento dei rifiuti dovuto all'obsolescenza delle vecchie apparecchiature.

- *Alto consumo energetico dei Data Center:* le tecnologie avanzate come i Data Center per il Cloud Computing richiedono una quantità considerevole di energia per il loro funzionamento, poiché questo è dovuto alla necessità di raffreddamento dei server e alla gestione delle enormi quantità di dati trasferiti e archiviati. Un crescente utilizzo di servizi cloud e l'espansione dei Data Center possono dunque portare a un aumento significativo del consumo energetico complessivo dell'industria tecnologica.

- *Necessità di un'adeguata gestione:* è dunque essenziale implementare politiche e pratiche efficaci per la gestione responsabile degli e-waste. Questo include la raccolta, il riciclo e il corretto smaltimento dei dispositivi elettronici a fine vita. Va da sé che le aziende devono assumersi la responsabilità del ciclo di vita completo dei loro prodotti, adottando strategie di progettazione ecologica che facilitino il riciclo e il recupero dei materiali, e ciò può risultare più o meno oneroso (Birkel et al., 2019).

4.3.3 Considerazioni

In generale, è stato riscontrato un maggiore consenso nell'indagine condotta da Dieste et. al. (2023) per gli impatti negativi sugli aspetti ambientali, mentre gli svantaggi sociali di I4.0 in termini di potenziali perdite di posti di lavoro dovute all'automazione sono infatti ancora molto controversi a causa dello scarso consenso sia sulla probabilità che sulla gravità, ma di questo ne parleremo meglio nella sezione dedicata.

In conclusione, allo studio di Dieste et. al (2023) sono anche state proposte delle azioni che possono aiutare a prevenire o mitigare alcuni aspetti negativi dovuti a questi impatti indiretti portati dalla Smart Factory, ma è emerso che allo stesso tempo potrebbero involontariamente entrare in conflitto con altri aspetti di sostenibilità. Nello specifico, Lopes de Sousa Jabbour et. al. (2018)[75] suggeriscono che l'Industria 4.0 può aiutare a sviluppare un percorso verso l'economia circolare e all'introduzione di catene di fornitura a circuito chiuso, riducendo così gli sprechi di materiali. Infatti, se si facilita l'economia circolare attraverso una migliore tracciabilità dei rifiuti, si può anche ottenere un'elaborazione dati molto più efficiente, anche se ciò comporterebbe un aumento del consumo energetico. In aggiunta i risultati indicano anche che l'uso di sensori e dispositivi di tracciabilità potrebbe aumentare la generazione di rifiuti, limitando così i benefici dell'economia circolare.

Alla luce dei risultati, le imprese devono essere molto caute nel caso volessero adottare le tecnologie 4.0 a fini di sostenibilità, comprendendo i benefici ma anche gli impatti negativi non intenzionali.

[75] Lopes de Sousa Jabbour A.B., Jabbour C.J.C., Godinho Filho M. and Roubaud D., 2018, Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations, *Annals of Operations Research,* vol. 270, pp. 273–286.

Non dimentichiamo, che i decisori politici possono giocare un ruolo fondamentale in questo tema molto delicato, poiché sono in grado di promuovere ed ampliare le connessioni delle catene di approvvigionamento, oltre alla cooperazione internazionale per raggiungere gli obiettivi di sostenibilità in un'ottica collettiva.

Gli interventi politici presentati sono particolarmente rilevanti difatti nel contesto della cosiddetta "Industria 5.0", sostenuto dalla Commissione Europea, che integra l'attuale I4.0 ad una visione dell'industria che mira oltre l'efficienza e la produttività, rafforzando suo il ruolo e il contributo nella società.
Le azioni politiche suggerite dal gruppo di esperti possono aiutare dunque a modellare questo approccio passando a un approccio maggiormente sostenibile e resiliente, con l'industria che si vede incentrata sull'uomo, piuttosto che concentrarsi sulla visione orientata esclusivamente alle tecnologie 4.0 (Commissione Europea, 2022)[76].

[76] https://ec.europa.eu

Tabella 4.1: *Tabella riassuntiva dei diversi impatti ambientali di I4.0.*

Aree di impatto ambientale	Aspetti positivi	Aspetti negativi
Ottimizzazione del consumo energetico	- Utilizzo di sensori e dispositivi IoT per monitorare il consumo energetico in tempo reale. - Sistemi automatizzati per ottimizzare l'uso dell'energia nei processi produttivi.	- In caso di guasti ai sistemi automatizzati, il controllo manuale può risultare difficile. - Sebbene aiutino a ottimizzare i consumi, i sensori e i sistemi di monitoraggio consumano anch'essi energia.
Migliore gestione dei rifiuti	- Utilizzo della stampa 3D per ridurre gli sprechi di materiale. - Strategie per facilitare il riciclo e il riutilizzo dei materiali.	- Alcuni materiali utilizzati nella produzione additiva possono essere difficili da riciclare o richiedere processi di smaltimento complessi.
Gestione intelligente delle risorse	- Uso di analisi dei dati per identificare sprechi, perdite e inefficienze, e di sensori IoT per monitorare quantità e qualità (es. dell'acqua). - Utilizzo di sistemi basati su dati meteorologici e analisi del suolo per l'irrigazione.	- Necessità di manutenzione costante dei sensori e sistemi per mantenerne l'efficienza. - Data center consumano molta energia.
Logistica sostenibile	- Sistemi di gestione del trasporto (TMS) per ottimizzare i percorsi di consegna e ridurre il consumo di carburante. - Implementazione di veicoli elettrici o ibridi per le consegne.	- Mancanza di stazioni di ricarica per veicoli elettrici, in particolare nelle aree rurali o remote. - Lo smaltimento scorretto di apparecchiature elettroniche può generare gravi impatti ambientali.
Impatti ecologici da produzione più sostenibile	- Sviluppo di processi produttivi più puliti e progettazione ecologica dei prodotti. - Uso di fonti energetiche rinnovabili	- Alcune aziende potrebbero presentare le loro attività come sostenibili senza modificare realmente i loro processi.

5 CAPITOLO 5: GLI IMPATTI SOCIALI

5.1 Premesse

Quando si studia un dato fenomeno innovativo dalla portata mondiale si tende spesso a porre più importanza agli aspetti prettamente tecnici ed ai suoi possibili risvolti nell'ambito economico, ma è invero e altresì importante soffermarsi e discutere approfonditamente degli impatti che questo può portare sulle persone in quanto esseri umani, e perciò sociali, che purtroppo spesso e volentieri vengono sottovalutati.

Nel nostro caso, parlare degli impatti sociali dell'Industria 4.0 è assolutamente fondamentale, poiché questa nuova era tecnologica non solo sta trasformando come abbiamo visto i processi produttivi e i modelli di business, ma sta anche ridisegnando il tessuto sociale e le dinamiche lavorative su scala globale. Le tecnologie avanzate come soprattutto l'Intelligenza Artificiale, l'Internet delle Cose e l'automazione, sebbene siano spesso celebrate per la loro capacità di migliorare l'efficienza e ridurre i costi, hanno implicazioni profonde che vanno ben oltre l'ambito strettamente economico. Questi sviluppi tecnologici stanno infatti modificando radicalmente la forza lavoro, le comunità e il modo in cui le persone vivono, interagiscono e percepiscono il mondo intorno a loro, come possiamo vedere in figura 5.1 (Sartal et al., 2020)[77]. Uno degli aspetti più rilevanti di questa trasformazione riguarda proprio la natura stessa del lavoro. Con l'introduzione di macchine sempre più intelligenti e sistemi automatizzati, molti lavori tradizionali stanno scomparendo, mentre ne emergono di nuovi che richiedono competenze tecniche avanzate e sempre più specifiche. Questo shift inarrestabile sta creando un divario progressivo e crescente tra coloro che possiedono le competenze necessarie per prosperare in questo nuovo contesto e coloro che rischiano di essere esclusi dal mercato del lavoro. La ridefinizione delle competenze non è un semplice aggiornamento delle capacità esistenti, ma richiede una riqualificazione completa, spingendo governi, istituzioni educative e imprese a ripensare i loro approcci alla formazione e all'istruzione (Satyro et al., 2022)[78]. Inoltre, l'Industria 4.0 non si limita a influenzare i lavoratori a livello individuale; essa ha un impatto significativo anche sulle comunità e sulle strutture sociali. Basti pensare alle aree industriali tradizionali, che un tempo offrivano lavoro a milioni di persone, che ora si trovano a dover affrontare una transizione verso un'economia digitale, spesso senza le risorse necessarie per gestire questo cambiamento. Questo fenomeno può portare a un aumento delle disuguaglianze regionali, con alcune aree che prosperano grazie alla nuova economia digitale, mentre altre soffrono di disoccupazione e declino economico. Pertanto, la trasformazione deve essere gestita in modo che le comunità possano adattarsi senza essere lasciate indietro, attraverso politiche che promuovano lo sviluppo inclusivo e sostenibile, come riportano Grybauskas et al. (2022)[79].

[77] Sartal A., Bellas R., Mej_ıas A.M. and García-Collado A., 2020, The sustainable manufacturing concept, evolution and opportunities within Industry 4.0: A literature review*, Advances in Mechanical Engineering*, vol. 12, n. 5.

[78] Satyro W. C., Cecília Maria Villas Bˆoas de Almeida, Marcos Jos´e A. Pinto Jr, Jos´e Celso Contador, Biagio F. Giannetti, Anderson Ferreira de Lima, Marco Aurelio Fragomeni, 2022, Industry 4.0 implementation: The relevance of sustainability and the potential social impact in a developing country*, Journal of Cleaner Production,* vol. 337.

[79] Grybauskas A., Stefanini A., Ghobakhloo M., 2022, Social sustainability in the age of digitalization: A systematic literature Review on the social implications of industry 4.0*, Technology in Society*, vol. 70.

Come esamineremo più da vicino, un altro aspetto cruciale riguarderà la distribuzione del reddito, nel cui contesto vedremo che la concentrazione della ricchezza nelle mani di coloro che controllano le nuove tecnologie è un rischio crescente nell'Industria 4.0. Le piattaforme digitali e le imprese tecnologiche possono certo generare immense ricchezze, ma spesso con una forza lavoro relativamente ridotta, rischiando così seriamente di aumentare anche di molto il divario tra ricchi e poveri. Questo squilibrio può avere conseguenze sociali e politiche di vasta portata, alimentando tensioni e insoddisfazioni che, se non affrontate, potrebbero minare la stabilità sociale.

Di conseguenza, secondo Grybauskas et al. (2022) sarà essenziale che le politiche pubbliche e le strategie aziendali tengano conto della necessità di una distribuzione più equa dei benefici economici derivanti dalle nuove tecnologie. Ovviamente le questioni non si fermano qui, dal momento che oltre agli aspetti economici e sociali, l'Industria 4.0 porta con sé anche sfide etiche e normative. La crescente automazione e l'uso dell'intelligenza artificiale sollevano domande importanti riguardo alla privacy, alla sicurezza dei dati e alla responsabilità delle decisioni prese da macchine intelligenti, come abbiamo già ampiamente avuto modo di constatare. Le implicazioni sociali di tali tecnologie vanno dunque ben oltre la sfera economica, toccando temi di fondamentale importanza per la democrazia e i diritti individuali. È cruciale che le società sviluppino quadri normativi in grado di proteggere i cittadini e garantire che l'adozione di nuove tecnologie avvenga in modo responsabile ed etico (Benotsmane et al., 2019)[80].

Esaminare gli impatti sociali dell'Industria 4.0 significa dunque riconoscere e affrontare le numerose sfide e opportunità che accompagnano questa rivoluzione, dato che è ora più che mai essenziale che la trasformazione digitale sia inclusiva e sostenibile, garantendo che i benefici siano equamente distribuiti e che nessuno venga lasciato indietro. Questo discorso non riguarda solo la tecnologia in sé, ma la sua interazione con le persone e le società, e come queste ultime possano adattarsi e prosperare in un mondo in rapido cambiamento. Solo attraverso un approccio olistico, che consideri non solo gli aspetti economici ma anche quelli sociali, etici e normativi, sarà possibile cogliere appieno il potenziale dell'Industria 4.0 e costruire un futuro più equo e sostenibile per tutti.

Qui di seguito ci focalizzeremo dunque in particolare sulle implicazioni per il mercato del lavoro, discutendo di come la digitalizzazione stia portando ad una crescente “disoccupazione tecnologica”, la ridefinizione delle competenze e dei ruoli nonché della formazione e la qualificazione professionale che ne consegue, per poi passare ad esaminare le varie disuguaglianze sociali che possono venirsi a creare, per poi sfociare nella disamina sugli effetti psicologici e socioculturali di questi importanti e a dir poco cruciali cambiamenti, evidenziando infine dunque alcune policy per gestire e contrastare al meglio questo cambiamento radicale che non solo le aziende, ma appunto anche e soprattutto le persone in primis stanno attraversando.

[80] Benotsmane R., Kovács G., and Dudás L., 2019, Economic, Social Impacts and Operation of Smart Factories in Industry 4.0 Focusing on Simulation and Artificial Intelligence of Collaborating Robots. *Social Sciences*, vol. 8, n. 5, 143.

Tabella 5.1: *Le differenze sociali e non tra fabbriche tradizionali e fabbriche intelligenti.*
Fonte: Benotsmane et al., 2019.
Adattato da: Gulinazzo Vittorio.

Caratteristica	Traditional Factory	Smart Factory
Controllo e monitoraggio	Controllo e monitoraggio centralizzati dei processi di produzione che utilizzano dispositivi di produzione tradizionali (macchine, strumenti, ecc.).	Controllo e monitoraggio decentralizzati dei processi di produzione che impiegano macchine intelligenti, robot, strumenti e pezzi di lavorazione intelligenti.
Comunicazione	Nessuna comunicazione continua tra esseri umani, macchine, strumenti e pezzi di lavorazione.	Comunicazione e collaborazione continua tra esseri umani, dispositivi intelligenti e pezzi di lavorazione intelligenti.
Utilizzo delle risorse	Basso utilizzo delle risorse umane e delle macchine a causa del controllo centralizzato.	Maggior utilizzo delle risorse grazie a operazioni auto-organizzanti, auto-regolanti e auto-adattanti.
Sostenibilità delle risorse	Le risorse sono limitate e le pratiche attuali non sono sostenibili.	Produzione sostenibile a lungo termine grazie a un utilizzo più efficiente delle risorse.
Flessibilità della produzione	Risorse limitate e predeterminate durante la produzione; linee di produzione fisse non configurabili.	Maggiore flessibilità nei sistemi di produzione e logistica che consente una produzione unica e su misura.
Tecnologia e interazione dei dispositivi	Uso di tecnologie elettroniche e IT, ma i dispositivi non interagiscono tra loro.	La tecnologia IoT consente ai dispositivi di comunicare e interagire tramite connessione di rete e scambio di dati.
Produttività, flessibilità e competitività	Bassa produttività, flessibilità, sostenibilità e minore efficienza nell'utilizzo delle risorse, con conseguente competitività ridotta.	Maggiore produttività, flessibilità, sostenibilità ed efficienza nell'uso delle risorse, aumentando la competitività dell'impresa.
Costi e tempi di produzione	La produzione tradizionale fornisce il volume e la qualità richiesti, ma con costi elevati e tempi di consegna lunghi.	La produzione intelligente fornisce volume e qualità richiesti con costi di produzione e tempi di consegna minimi.
Tipo di prodotto	Produzione di merci di base tradizionali con bassa varietà di prodotto, elevato volume e ciclo di vita relativamente lungo.	Produzione di prodotti finali più innovativi, unici e su misura, con maggiore varietà, minore volume e ciclo di vita breve.
Errori e sprechi	Errori frequenti nel processo di produzione che causano sprechi, costi extra e tempi di consegna lunghi.	Eventi stocastici e errori possono essere minimizzati, riducendo sprechi, costi totali e tempi di consegna.
Forza lavoro e costi del lavoro	Necessità di una forza lavoro numerosa, quindi costi del lavoro elevati; la maggior parte degli operatori è poco qualificata.	Parte della forza lavoro può essere ridotta e sostituita da dispositivi intelligenti; è richiesta una forza lavoro altamente qualificata per la programmazione e il funzionamento dei dispositivi intelligenti.

5.2 Impatti sul mondo del lavoro

5.2.1 Automazione e disoccupazione tecnologica

L'automazione rappresenta uno degli elementi cardine dell'Industria 4.0. L'introduzione di robot avanzati, sistemi supportati dall'intelligenza artificiale e l'IoT ha portato a un significativo aumento dell'efficienza e della produttività nei processi produttivi. Tuttavia, questa trasformazione ha generato preoccupazioni riguardo alla disoccupazione tecnologica, ovvero la perdita di posti di lavoro dovuta alla sostituzione di lavoratori umani con macchine. Secondo uno studio del McKinsey Global Institute (2017)[81], entro il 2030, l'automazione potrebbe portare alla sostituzione di circa il 15% della forza lavoro globale, una percentuale di certo non così irrisoria. I settori maggiormente a rischio sono sicuramente quelli caratterizzati da attività ripetitive e facilmente automatizzabili, come la produzione manifatturiera, la logistica e l'amministrazione, anche se tuttavia c'è da dire che l'impatto dell'automazione varia significativamente a seconda del contesto geografico e del livello di sviluppo economico di un paese.

Malgrado queste previsioni allarmistiche, vengono in contrasto ad esse diversi economisti e studi, come quello di Sartal et al. (2020), i quali, pur riconoscendo il problema, sostengono che l'Industria 4.0 creerà anche e principalmente nuove opportunità lavorative, specialmente in ambiti legati alla gestione, manutenzione e sviluppo delle nuove tecnologie, oltre a permettere lo sviluppo delle regioni più svantaggiate e la riduzione del sovraffollamento nelle aree urbane. Anche in questo caso occorre però sottolineare che tali nuove opportunità richiedono competenze altamente specializzate, e per questo motivo costituiscono una sfida per il sistema educativo e formativo.

5.2.2 Trasformazione delle competenze

Nonostante l'automazione e la robotica siano dunque la principale causa della progressiva sostituzione dei lavori manuali e ripetitivi, portando ad una riduzione della domanda per alcuni ruoli tradizionali, è al contempo assodato che abbiano anche spinto le imprese a riallocare le risorse umane verso compiti più complessi e creativi, in accordo con Satyro et al. (2022). Ovviamente possiamo comprendere che i settori caratterizzati da compiti ripetitivi e a basso valore aggiunto sono i più colpiti. Per esempio, nell'industria tessile o nell'assemblaggio di elettronica, molte posizioni sono state eliminate a favore di sistemi automatizzati, e ciò ha avuto un impatto particolarmente forte nelle economie emergenti, dove molti lavori manuali erano concentrati. Si può anche poi pensare ad esempio alla diminuzione della necessità di manodopera in settori come la produzione manifatturiera e la logistica, ovvero attività che richiedevano un alto livello di lavoro manuale, come l'assemblaggio di componenti o la movimentazione di materiali, che però sono ora gestite da macchine, con una maggiore precisione e velocità, mentre così l'uomo può occuparsi di compiti fisicamente meno onerosi e maggiormente stimolanti (Benotsmane et al., 2019). Inoltre, sebbene da un lato l'automazione riduca la necessità di lavoratori per operazioni manuali, dall'altro aumenta la domanda di competenze per la supervisione e la manutenzione delle macchine.

[81] McKinsey Global Institute, 2017, *What the future of work will mean for jobs, skills, and wages: Jobs lost, jobs gained*.

Gli operatori ora devono essere quindi capaci di gestire sistemi complessi, intervenire in caso di malfunzionamenti e collaborare con i team di ingegneria per ottimizzare le prestazioni delle macchine (Grybauskas et al., 2022). Con l'avvento dell'Industria 4.0 dunque, le competenze richieste ai lavoratori stanno cambiando non solo rapidamente ma anche radicalmente; tuttavia, grazie alle infinite possibilità conseguenti alla digitalizzazione, si stanno creando moltissime nuove opportunità di lavoro che potranno offrire maggior sicurezza e benessere al personale, con l'IA che garantirà assistenza nei vari compiti e permetterà una maggiore libertà di espressione delle capacità umane. Le tecnologie digitali e l'automazione impongono come abbiamo potuto constatare una maggiore domanda di competenze tecniche, quali la capacità di operare con macchinari automatizzati, la programmazione di software, l'analisi dei big data e la comprensione dei sistemi cyber-fisici. La World Economic Forum nel suo "Future of Jobs Report" del 2020 ha identificato le competenze più richieste nel prossimo decennio, dove tra queste figurano il pensiero critico, la risoluzione di problemi complessi, la gestione di persone, e soprattutto le competenze digitali avanzate. La trasformazione delle competenze implica quindi un notevole investimento nella formazione continua e nella riqualificazione professionale (reskilling e upskilling), sia per i lavoratori esistenti sia per i nuovi ingressi nel mercato del lavoro[82]. Di conseguenza, le aziende stanno iniziando a riconoscere l'importanza di investire nella formazione dei propri dipendenti, ma sono presenti ancora lacune piuttosto importanti, specialmente nelle piccole e medie imprese, dove le risorse per la formazione sono spesso limitate; senza contare che i sistemi educativi tradizionali non sono sempre pronti ad affrontare queste nuove esigenze, rendendo necessaria una riforma del sistema formativo per allinearlo alle richieste dell'Industria 4.0.

5.2.3 Nuovi ruoli e precarizzazione del lavoro

Mentre alcuni lavori sono dunque eliminati, l'Industria 4.0 crea nuove opportunità occupazionali in aree emergenti, dal momento che la digitalizzazione e l'automazione richiedono si nuove competenze, ma allo stesso tempo portano alla nascita di nuove professioni e alla trasformazione di quelle esistenti. Benotsmane et al. (2019) riportano come la diffusione dell'Industria 4.0 ha fatto crescere la domanda per professioni legate all'IT, come sviluppatori di software, ingegneri di automazione, data scientists, esperti di intelligenza artificiale e specialisti di cybersecurity, ruoli che sono assolutamente cruciali per progettare, implementare e gestire le nuove tecnologie all'interno delle imprese. Inoltre, evidenzia sempre lo stesso studio, le nuove professioni richiedono una combinazione di competenze tecniche, digitali e di problem-solving: ad esempio, un ingegnere industriale oggi deve essere anche capace di programmare robot, analizzare dati complessi e implementare soluzioni IoT. Questo porta alla necessità di programmi di formazione avanzata e continua, che permettano ai lavoratori di acquisire e aggiornare le competenze richieste, vista la rapida evoluzione che contraddistingue il panorama 4.0. Dato che quindi i lavoratori devono essere disposti a impegnarsi in un apprendimento permanente per rimanere competitivi nel mercato del lavoro, ne consegue che soprattutto in questi ultimi anni si rileva un forte aumento della domanda di corsi di formazione online, workshop aziendali e programmi di aggiornamento professionale, creando dunque nuove modalità di business per gli enti che sono in grado di offrire tali servizi (Grybauskas et al., 2022).

[82] World Economic Forum, 2020, *The Future of Jobs Report 2020.*

In tale contesto, dunque, non si tratta solo di acquisire nuove competenze tecniche, ma anche di adattarsi a un ambiente lavorativo in rapido cambiamento, caratterizzato da una crescente integrazione tra uomo e macchina. Inoltre, Grybauskas et al. (2022) evidenziano che tali competenze non sono più riservate ai soli ingegneri o tecnici, ma stanno diventando necessarie anche per i ruoli manageriali e strategici. In aggiunta alle competenze tecniche, anche le soft skills come la capacità di problem-solving, il pensiero critico, la comunicazione e la collaborazione sono diventate sempre più importanti, visto che appunto parliamo di un ambiente di lavoro in continua evoluzione, dove la capacità di adattarsi rapidamente e di lavorare efficacemente in team interdisciplinari è essenziale.

Oltre a questo, non dimentichiamo che la digitalizzazione consente anche nuove modalità di lavoro, come il telelavoro, meglio conosciuto come “smart working” e il lavoro flessibile. Gran parte del peso della causa di questo fenomeno è da attribuire alla pandemia del COVID-19, la quale ha accelerato di non poco questa tendenza, dimostrando che molte attività possono essere svolte efficacemente da remoto. Questo ha avuto poi implicazioni sia per l'organizzazione del lavoro che per la conciliazione tra vita lavorativa e privata, migliorando di fatto la qualità della vita per molti lavoratori. Tuttavia, malgrado l'Industria 4.0 abbia pur contribuito alla crescita di nuove forme di lavoro, di cui molte caratterizzate da un alto grado di flessibilità, dall’altra parte ve ne sono anche altrettante dotate di una maggiore precarietà. Per fornire un esempio alla comprensione di tale concetto, prendiamo il lavoro svolto su piattaforme digitali, che sta diventando sempre più comune. Infatti, nonostante sia una delle tipologie che si presta maggiormente ad essere al passo con i tempi, e spesso definito gig economy, si basa su contratti a breve termine o lavoro autonomo, piuttosto che su impieghi stabili e a tempo pieno, il che non è idoneo a moltissime persone (Satyro et al., 2022). La precarizzazione del lavoro, come quella citata nell’esempio, ha diverse implicazioni sociali ed economiche. In primo luogo, la mancanza di sicurezza lavorativa può portare a un peggioramento delle condizioni di vita dei lavoratori, poiché essi potrebbero non avere accesso a benefici sociali come la previdenza, l'assicurazione sanitaria, e le ferie pagate. Inoltre, la flessibilità estrema può creare una pressione psicologica sui lavoratori, che potrebbero trovarsi costantemente in bilico tra la necessità di lavorare e quella di garantire un equilibrio tra vita lavorativa e personale. Un rapporto dell'Organizzazione Internazionale del Lavoro (ILO) ha evidenziato infatti come queste nuove forme di lavoro stiano modificando la struttura del mercato del lavoro, riducendo la protezione sociale e aumentando il rischio di disuguaglianze. Ne consegue allora che questa tendenza, seppur principalmente positiva, richiede un intervento politico per regolamentare meglio il lavoro su piattaforma e garantire che i diritti dei lavoratori siano adeguatamente protetti[83].

5.3 Effetti psicologici e socioculturali

A seguito dell'introduzione di tecnologie avanzate e l'automazione dei processi produttivi il mondo del lavoro e dell’industria non ha solo un impatto economico, ma anche significativi effetti psicologici e socioculturali, di cui si pone ancora poca attenzione. Questi cambiamenti influenzano profondamente il benessere mentale dei lavoratori, le dinamiche sociali all'interno e all'esterno del luogo di lavoro e la struttura stessa della società. In questa sezione, si esplorano in dettaglio gli effetti

[83] International Labour Organization (ILO), 2021, *World Employment and Social Outlook 2021: The role of digital labor platforms in transforming the world of work.*

psicologici legati allo stress e al benessere psicologico, nonché i cambiamenti nelle relazioni sociali. In virtù di questo, fortunatamente con il passare degli anni sempre più enti, media, giornali e imprese stanno incominciando a considerare seriamente questi effetti che vanno poi ad impattare sulla economia di tutti i giorni.

5.3.1 Stress e benessere psicologico

Vista la natura profondamente scardinante dell'Industria 4.0 è perfettamente logico aspettarsi che essa possa influenzare negativamente il benessere psicologico dei lavoratori. Per citare un aspetto cruciale, basti pensare al fatto che le tecnologie avanzate permettono una maggiore sorveglianza sul posto di lavoro: in accordo con Satyro et al. (2020) e Ross et al (2023)[84] sensori, software di monitoraggio e sistemi di gestione digitali consentono alle aziende, infatti, di monitorare in tempo reale le performance dei dipendenti. Sebbene queste pratiche possano migliorare l'efficienza e la produttività, esse possono anche creare un ambiente lavorativo altamente stressante. Questo perché i lavoratori, consapevoli di essere costantemente monitorati, possono sentirsi sotto pressione per mantenere standard elevati di produttività, il che può portare a un aumento dello stress e dell'ansia. Uno studio pubblicato da Consiglio et al., (2023)[85] evidenzia come la sorveglianza costante possa aumentare i livelli di stress lavorativo e diminuire il benessere psicologico dei lavoratori, il che porta ad associare tale fenomeno ad una riduzione dell'autonomia lavorativa e a un aumento del burnout.

Oltre a questo, l'introduzione dell'automazione e l'intelligenza artificiale hanno creato una crescente incertezza nel mercato del lavoro, dal momento che i lavoratori temono la possibilità di perdere il proprio impiego a causa della sostituzione con macchine o algoritmi, una condizione spesso definita come "ansia tecnologica". Questa incertezza può avere effetti profondamente negativi sul benessere psicologico, contribuendo a un aumento dell'ansia e della depressione tra i lavoratori. A tal proposito uno studio dell'American Psychological Association (APA) ha mostrato come la paura della disoccupazione tecnologica possa essere collegata a livelli più elevati di ansia e insicurezza finanziaria, che a loro volta influiscono negativamente sulla salute mentale generale[86].

Abbiamo detto poi che l'Industria 4.0 richiede ai lavoratori di aggiornare costantemente le proprie competenze per rimanere competitivi, ma anche questa necessità di formazione continua può essere una fonte di stress, soprattutto per coloro che hanno difficoltà ad adattarsi alle nuove tecnologie o che hanno meno risorse per accedere a opportunità di apprendimento. Anche per quanto concerne il concetto di "lifelong learning", che è diventato anch'esso centrale nell'era dell'Industria 4.0, può comportare talvolta ansia legata all'apprendimento e alla riqualificazione, e può quindi influire negativamente sul benessere psicologico, soprattutto tra i lavoratori più anziani e quelli meno qualificati.

---

[84] Ross P. M., Scanes E., Locke W., 2023, Stress adaptation and resilience of academics in higher education. *Asia Pacific Education Review*, vol. 25, pp. 29–849.

[85] Consiglio C., Massa N., Sommovigo V., and Fusco L., 2023, Techno-Stress Creators, Burnout and Psychological Health among Remote Workers during the Pandemic: The Moderating Role of E-Work Self-Efficacy*, Environmental Research and Public Health*, vol. 20, n. 22.

[86] American Psychological Association (APA), 2019, *Technology and the Future of Work.*

La letteratura in ambito psicologico (Emerson et al., 2022[87]; Ross et al., 2023) ha evidenziato come l'apprendimento forzato e l'adattamento costante possano portare a sentimenti di inadeguatezza e stress, aumentando il rischio di burnout.

5.3.2 Cambiamenti nelle relazioni sociali

Altra cosa da tenere in considerazione è che l'Industria 4.0 non solo influisce sulle condizioni psicologiche dei lavoratori, ma anche sulle relazioni sociali sia all'interno dei luoghi di lavoro che nella società in generale. È chiaro che con l'avvento della digitalizzazione dei processi lavorativi, le interazioni umane dirette tendono a diminuire. Le nuove tecnologie certamente da un lato permettono una maggiore efficienza e velocità, ma dall'altro questo viene spesso a scapito delle relazioni interpersonali. Ad esempio, la comunicazione attraverso piattaforme digitali e l'uso di robot o IA per gestire compiti che richiedevano in passato un contatto umano diretto possono ridurre le opportunità di interazione sociale tra colleghi (Sartal et al., 2020). Inoltre, anche la riduzione delle interazioni faccia a faccia può portare a un senso di isolamento tra i lavoratori, diminuendo il senso di appartenenza e coesione all'interno dell'ambiente di lavoro. Questo può avere effetti negativi non solo sul morale, ma anche sulla capacità di lavorare efficacemente in team, come evidenziato da studi in ambito di psicologia organizzativa (Ross et al., 2023). Come secondo punto, dato che l'Industria 4.0 sta anche modificando le dinamiche sociali su scala più ampia, ne consegue che la crescente dipendenza dalle tecnologie digitali può portare a una ristrutturazione delle reti sociali e delle relazioni personali. Difatti, basti osservare le interazioni social, che in accordo con Emerson et al. (2022) si stanno spostando sempre più dalle interazioni dirette a quelle mediate dalla tecnologia, attraverso social media, piattaforme di comunicazione online e ambienti di lavoro virtuali. Guardiamo anche l'elevata flessibilità portata dalla digitalizzazione del lavoro, con i suoi effetti positivi sulla conciliazione tra vita privata e lavorativa: l'Industria 4.0 ha reso infatti possibile il lavoro agile, dove i dipendenti possono lavorare in modo più flessibile, sia in termini di orari che di luogo di lavoro. Questo è particolarmente evidente con l'aumento del telelavoro, che offre ai lavoratori la possibilità di gestire meglio il loro tempo e bilanciare le esigenze personali e professionali. Inoltre, il lavoro da remoto riduce la necessità di lunghi spostamenti, migliorando la qualità della vita dei lavoratori e riducendo l'impatto ambientale. Questo cambiamento potrebbe avere effetti a lungo termine sul modo in cui le città sono organizzate, con una minore concentrazione di persone nei centri urbani durante le ore di lavoro (Satyro et al., 2022). Nonostante però i numerosi benefici, Satyro et al. (2022) rilevano e spiegano come in ogni caso la maggiore flessibilità comporti anche delle sfide, come la difficoltà di disconnettersi dal lavoro e il rischio di isolamento.

Le imprese devono quindi trovare un equilibrio tra flessibilità e benessere dei dipendenti, implementando politiche che promuovano un sano equilibrio tra vita lavorativa e privata**.** Questi cambiamenti possono avere dunque implicazioni sia positive che negative. Da una parte, le tecnologie digitali possono connettere persone a grandi distanze e creare nuove forme di comunità, mentre dall'altra possono contribuire all'atomizzazione sociale, dove le relazioni diventano più superficiali e la solitudine diventa un problema crescente.

[87] Emerson D.J., Hair Jr J.F.H. and Kenneth J. Smith K.J., 2023, Psychological Distress, Burnout, and Business Student Turnover: The Role of Resilience as a Coping Mechanism, *Research in Higher Education*, vol. 64, pp. 228–259.

Studi sociologici come quelli di Emerson et al. (2022) e di Ross et al. (2023) hanno evidenziato come la crescente digitalizzazione delle relazioni possa portare a una diminuzione della qualità delle interazioni sociali e a un aumento del senso di alienazione, con conseguenze anche gravi.

5.3.3 Impatti nel lavoro: tra gestione, ripercussioni psicofisiche e cambiamento

Citando ancora una volta lo studio Gracia et al. (2023), possiamo vedere come alcune implicazioni sociali negative non intenzionali dell'Industria 4.0 sono state evidenziate dalla letteratura. In primo luogo, sin dal suo inizio, una delle sfide più preoccupanti delle tecnologie 4.0 è costituita dal fatto che esse hanno un impatto complessivamente negativo sull'occupazione (Kamble et al., 2018)[88]. Secondo Grigore et al. (2021)[89], la digitalizzazione tende a sostituire alcuni lavoratori poco qualificati che svolgono soprattutto compiti semplici e ripetitivi, anche se, tuttavia, questa perdita di posti di lavoro dovrebbe essere bilanciata dall'aumento della domanda per posizioni più qualificate. Autori come Muller et al. (2018) e Birkel et al (2019) affermano inoltre che la letteratura esistente non può ancora fornire una prospettiva unificata sul fatto che l'Industria 4.0 causerà un aumento o una diminuzione del numero totale dei dipendenti nel settore manifatturiero. In secondo luogo, alcuni studi suggeriscono che le tecnologie Smart Factory (ad esempio CPS, IoT, cloud computing) causano una perdita della privacy e dell'autonomia personale dei dipendenti (Sugiyama et al., 2017)[90], sottolineando che questo è uno degli effetti collaterali non desiderati della transizione digitale, anche se più recentemente Bai et al. (2020) suggeriscono che le tecnologie cloud e i big data abbiano invece un impatto positivo sulla sostenibilità sociale. Tuttavia, gli autori evidenziano potenziali problemi di privacy e autonomia personale legati alla condivisione dei dati nel cloud. Da questo Cirillo et al (2021) concludono che l'autonomia dei dipendenti I4.0 aumenta il controllo di gestione. In terzo luogo, la connettività facilitata dalle tecnologie 4.0 potrebbe portare a una vita lavorativa insalubre. Infatti, abbiamo visto come a causa della natura scardinante della trasformazione digitale e di alcune delle sue pratiche possano generarsi importanti fonti di stress o di problemi legati alla salute mentale. Ad esempio, il digitale dell'era dell'Industria 4.0 consente ai dipendenti di continuare a lavorare anche quando si è lontani dall'ufficio, cosa che può portare ad isolarsi; oppure ancora le attività lavorative al di fuori dell'orario previsto a causa della maggiore flessibilità se non gestite a dovere possono portare a depressione e malattie mentali.

Tuttavia, queste stesse tecnologie sollevano anche da diverse preoccupazioni, come ad esempio per quanto riguarda la sorveglianza, poiché ormai tutti i contratti di lavoro sono basati sullo sfruttamento e la privacy dei dati. Inoltre, come riportato da Schneider e Kokshagina (2021)[91], il posto di lavoro

[88] Kamble S.S., Gunasekaran A. and Gawankar S.A., 2018, Sustainable industry 4.0 framework: a systematic literature review identifying the current trends and future perspectives, *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 117, pp. 408-425.

[89] Grigore G., Molesworth M., Miles C. and Glozer S., 2021, (Un) resolving digital technology paradoxes through the rhetoric of balance*, Organization,* vol. 28, n. 1, pp. 186–207.

[90] Sugiyama M., Deguchi H., Ema A., Kishimoto A., Mori J., Shiroyama H. and Scholz R.W., 2017, Unintended side effects of digital transition: perspectives of Japanese Experts, *Sustainability*, vol. 9, n. 12, pp. 21-93.

[91] Schneider S. and Kokshagina O., 2021, Digital transformation: what we have learned (thus far) and what is next, *Creativity and Innovation Management*, vol. 30, n. 2**,** pp. 384-411.

digitale può essere più faticoso, poiché richiede ai dipendenti di bilanciare il tempo di lavoro e quello di riposo, senza contare le competenze emotive richieste, le difficoltà nel lavoro a distanza, e la valutazione dei contributi individuali all'interno dell'azienda possono portare a ulteriore stress. Questo argomento ha acquisito molta rilevanza poiché la pandemia di COVID-19 ha inevitabilmente portato nuove modalità di lavoro che potrebbero diventare parte integrante della realtà post-pandemia (Narayanamurthy e Tortorella, 2021)[92]. In quarto luogo, alcuni studiosi riconoscono che i robot autonomi e collaborativi possono causare problemi di salute e sicurezza quando interagiscono con i dipendenti (Li et al., 2019), affermando che possono verificarsi collisioni accidentali possono durante processo di interazione uomo-robot in uno spazio fisico limitato e condiviso; inoltre, secondo Dalmarco et al. (2020)[93] in officina le macchine possono generare rischi nelle interazioni con i lavoratori.

5.4 Sfide e considerazioni

L'Industria 4.0 non sta solo influenzando pesantemente il mercato del lavoro, ma ha anche significative implicazioni per quanto riguarda le disuguaglianze sociali. L'adozione delle tecnologie avanzate 4.0 può infatti amplificare le differenze già esistenti tra diverse fasce della popolazione, influenzando l'accesso alle opportunità economiche, educative e sociali. In questa sezione, si analizzano in dettaglio due principali aree di impatto: il cosiddetto "divario digitale" e le conseguenze per i gruppi sociali vulnerabili.

5.4.1 Divario digitale

Il divario digitale rappresenta una delle sfide più critiche nel contesto dell'Industria 4.0. Questo fenomeno si riferisce alla disuguaglianza nell'accesso e nell'uso delle tecnologie digitali tra diverse popolazioni, determinata da fattori economici, geografici, educativi e culturali. Con l'avvento dell'Industria 4.0, questo gap può ulteriormente accentuarsi, creando nuove forme di esclusione sociale. Una delle principali manifestazioni del divario digitale difatti è la disuguaglianza nell'accesso alle tecnologie: in molti paesi, specialmente quelli in via di sviluppo, una parte significativa della popolazione non ha accesso a Internet ad alta velocità, a dispositivi tecnologici moderni o a infrastrutture digitali adeguate, e questo limita gravemente la loro capacità di partecipare pienamente all'economia digitale. Secondo un rapporto dell'International Telecommunication Union (ITU)[94], nel 2020, quasi il 50% della popolazione mondiale non aveva accesso a internet, con enormi disparità tra le diverse regioni. Questa mancanza di accesso rappresenta un ostacolo significativo per l'inclusione economica e sociale, impedendo a milioni di persone di sfruttare le opportunità offerte dall'Industria 4.0. Oltre all'accesso, esiste una differenza significativa anche nelle competenze digitali, che rappresenta un altro aspetto cruciale del divario digitale. Tali competenze, che comprendono la

[92] Narayanamurthy G. and Tortorella G., 2021, Impact of COVID-19 outbreak on employee performance–moderating role of industry 4.0 base technologies, *International Journal of Production Economics*, vol. 234.

[93] Dalmarco G., Ramalho F.R., Barros A.C. and Soares A.L., 2019, Providing industry 4.0 technologies: the case of a production technology cluster, *The Journal of High Technology Management Research*, vol. 30, n. 2.

[94] International Telecommunication Union (ITU), 2020, *Measuring Digital Development: Facts and Figures 2020.*

capacità di utilizzare efficacemente dispositivi tecnologici, software e piattaforme online, sono diventate essenziali in un mondo sempre più digitalizzato.

Il World Economic Forum ha evidenziato che le competenze digitali di base sono ancora carenti in molte parti del mondo, specialmente tra le popolazioni meno istruite e nelle aree rurali, e tale carenza limita la capacità delle persone di accedere a lavori qualificati, partecipare alla formazione continua e sfruttare le opportunità offerte dalle nuove tecnologie[95].

5.4.2 Impatto sui gruppi vulnerabili

L'avvento dell'Industria 4.0 come sappiamo porta ad innumerevoli conseguenze, tra le quali è doveroso menzionare i possibili effetti particolarmente negativi che può avere su gruppi sociali già vulnerabili, come le persone a basso reddito, gli anziani, le donne e coloro con basse qualifiche professionali; e anche se è pur vero che comunque le nuove tecnologie possono anche contribuire a una maggiore inclusione e diversità nel mondo del lavoro, e perciò aprendo opportunità per gruppi precedentemente svantaggiati, vi sono diverse tipologie di gruppi come quelle sopra citate che rischiano di essere ulteriormente marginalizzati in un'economia sempre più dominata dalle tecnologie avanzate.

Diversi studi come Satyro et al. (2022) ad esempio riportano che una delle categorie che si trovano ad essere in una posizione critica è costituita dalle persone a basso reddito e dagli anziani. Le famiglie a basso reddito, infatti, spesso non possono permettersi l'acquisto di dispositivi tecnologici o l'accesso a servizi internet di qualità, e questo limita gravemente le loro opportunità di partecipare all'economia digitale e di migliorare la propria condizione economica. Gli anziani, d'altra parte, tendono ad avere competenze digitali limitate e sono molto spesso meno propensi ad adattarsi alle nuove tecnologie, il che li rende particolarmente vulnerabili all'esclusione digitale, con conseguenti difficoltà nell'accesso a servizi essenziali, come l'assistenza sanitaria digitale e le piattaforme di servizi sociali. Satyro et al. (2022) continuano poi discutendo in merito ad un altro grande problema, che è rappresentato dalle persone con disabilità, le quali proprio in virtù della loro condizione possono facilmente trovarsi in difficoltà ad interfacciarsi ad una realtà così unica e complessa. Tuttavia, le tecnologie assistive e la possibilità di lavorare da remoto hanno migliorato l'accesso al lavoro per le persone DSA. Ad esempio, software di riconoscimento vocale, dispositivi di realtà aumentata e robotica assistiva consentono a persone con diverse abilità di partecipare attivamente al mercato del lavoro, e ciò può andare a vantaggio anche alle persone anziane.

Si evidenzia inoltre che la modalità di lavorare in smart riduce anche l'importanza della posizione geografica, permettendo alle imprese di attingere a talenti globali, e questo può contribuire a una maggiore diversità nei team aziendali e a un'inclusione più ampia di culture e prospettive diverse. Oltre a tali categorie, le donne e le persone con basse qualifiche professionali rappresentano altri due gruppi a rischio (Grybauskas et al., 2022)[96].

[95] World Economic Forum, 2018, *Future of Jobs.*

[96] Grybauskas A., Stefanini A., Ghobakhloo M., 2022, Social sustainability in the age of digitalization: A systematic literature Review on the social implications of industry 4.0*, Technology in Society*, vol. 70.

Le donne, in particolare, sono sottorappresentate nei settori tecnologici e scientifici, che sono al centro dell'Industria 4.0, il che può portare a una perpetuazione delle disuguaglianze di genere nel mercato del lavoro, con le donne che rimangono concentrate in occupazioni meno remunerative e meno sicure. Inoltre, inutile dire che anche e soprattutto le persone con basse qualifiche professionali sono particolarmente vulnerabili alla disoccupazione tecnologica, dal momento che l'automazione tende a colpire maggiormente i lavori manuali e ripetitivi, i quali sono spesso occupati da lavoratori con livelli di istruzione più bassi. Questo fenomeno può portare a un aumento delle disuguaglianze economiche e sociali, con un numero crescente di persone escluse dal mercato del lavoro o costrette a svolgere lavori precari e mal remunerati.

Secondo sempre Grybauskas et al. (2022) tuttavia l'Industria 4.0, visti i suoi propositi e potenzialità, può comunque contribuire a colmare il divario di genere nel mondo del lavoro, offrendo nuove opportunità anche alle donne, in settori tradizionalmente dominati dagli uomini. Occorre però tenere bene a mente che per realizzare questo ordine paritario di opportunità e tutele, è necessario un impegno attivo da parte delle imprese e delle istituzioni per promuovere la parità di accesso alle nuove professioni digitali.

Come altro punto, altri studi evidenziano come oltre ai danni psicologici possono anche sopraggiungere disagi fisici: si prendano ad esempio la realtà virtuale e la realtà aumentata, che a causa delle loro caratteristiche peculiari possono provocare mal di testa, vertigini e altri sintomi. Studi come Tsai e Huang (2018) riportano infatti come la maggior parte degli utenti di occhiali intelligenti lamentano vertigini, affermando che diversi utenti hanno notato affaticamento visivo dopo aver eseguito attività di manutenzione indossando gli occhiali Google.

Rodriguez et al. (2021) inoltre mostrano che ci è voluto del tempo perché gli occhi degli utenti si adattassero agli occhiali intelligenti, poiché essi risultavano scomodi e per via del fatto che gli operatori hanno avvertito mal di testa dopo averli indossati per un certo intervallo di tempo. In sesto luogo, l'utilizzo dell'additive manufacturing negli ambienti di produzione provoca talvolta gravi reazioni cutanee, irritazione agli occhi e altre varie irritazioni agli operatori coinvolti. In più, Vaisanen et al. (2019) hanno misurato le concentrazioni di agenti contaminanti gassosi e particolati provenienti dai processi di produzione additiva nell'ambiente lavorativo, e hanno scoperto che le operazioni di stampa 3D hanno emesso contaminanti potenzialmente dannosi. Inoltre, secondo i risultati di Chan et al. (2021), queste sostanze cancerogene aumentano quando più dispositivi AM funzionano simultaneamente, per cui gli autori raccomandano il rispetto delle buone pratiche di sicurezza e igiene quando questa tecnologia viene utilizzata. Dunque, Gracia et al. (2023) concludono che l'AM, AR, e altre tecnologie 4.0 possono avere diverse implicazioni per la sostenibilità sociale, comprese la salute e la sicurezza.

Di seguito viene proposta una sintesi dei vari aspetti positivi e negativi degli impatti sociali di I4.0 schematizzata in figura 5.2, dalle nuove opportunità di lavoro, alla maggior sicurezza e produttività, alla diversità delle varie competenze digitali, all'incertezza lavorativa e alla salute dei dipendenti.

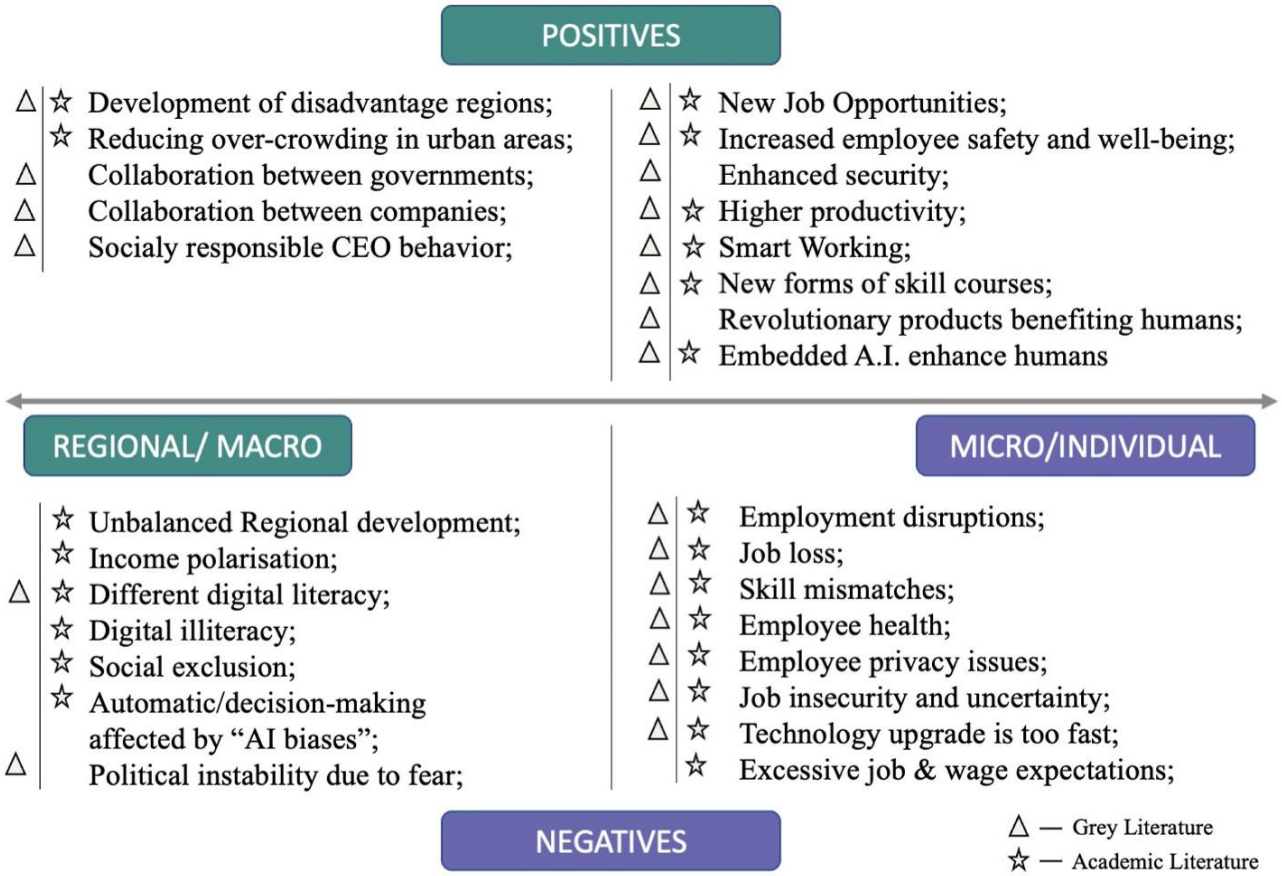

Fig. 5.2: *Riepilogo delle implicazioni positive/negative riscontrate nella letteratura accademica*
Fonte: Grybauscas, 2022.

5.5 Policy e interventi per il benessere psicologico e le relazioni sociali

Per mitigare gli effetti negativi dell'Industria 4.0 sul benessere psicologico e le relazioni sociali, è sicuramente essenziale implementare politiche e interventi mirati. Tali politiche di mitigazione degli impatti sociali sono cruciali per garantire che i benefici dell'Industria 4.0 siano equamente distribuiti e che i gruppi vulnerabili non siano ulteriormente svantaggiati, e dovrebbero includere investimenti nell'infrastruttura digitale, programmi di formazione per migliorare le competenze digitali della popolazione e iniziative volte a garantire un accesso equo alle tecnologie. In questa sezione, si esaminano le principali strategie e politiche pubbliche che possono contribuire a ridurre le disuguaglianze sociali, proteggere i lavoratori e promuovere l'inclusione digitale.

5.5.1 Inclusione digitale

L'inclusione digitale è fondamentale per ridurre le disuguaglianze sociali nell'era dell'Industria 4.0. Ciò include l'espansione dell'accesso a Internet nelle aree rurali e sottosviluppate, la promozione dell'alfabetizzazione digitale e la fornitura di dispositivi tecnologici a prezzi accessibili. Inoltre, è essenziale che le politiche di inclusione digitale siano accompagnate da misure per garantire la parità di genere nell'accesso alle opportunità digitali.

Oltre a questo, l'International Labour Organization (2021)[97] sottolinea come occorra pensare anche alla formazione e alla riqualificazione del personale, aspetti anch'essi cruciali al fine di garantire che tutti i gruppi sociali possano beneficiare delle opportunità offerte dall'Industria 4.0.

I governi e le imprese devono investire in programmi di formazione che siano accessibili a tutte le fasce della popolazione, con particolare attenzione ai gruppi vulnerabili. Inoltre, è necessario sviluppare programmi di formazione specifici per le donne e le persone con basse qualifiche professionali, al fine di ridurre le disuguaglianze nel mercato del lavoro e per aiutarli a mantenere e migliorare le loro competenze in un mercato del lavoro in rapida evoluzione. Questo può includere incentivi per la partecipazione a corsi di formazione, programmi di apprendistato e supporto per la transizione verso nuovi settori.

Dunque, le trasformazioni portate dall'Industria 4.0, presentando sfide significative per le politiche sociali e del lavoro, comporta che queste devono adattarsi per supportare i lavoratori e garantire che i benefici della digitalizzazione siano distribuiti in modo equo. Ne consegue che, a seguito di questa trasformazione radicale del mercato del lavoro, i sistemi di welfare devono essere ripensati per proteggere i lavoratori in un contesto di maggiore incertezza e cambiamento. Inoltre, l'aumento del lavoro freelance, dei contratti a breve termine e delle piattaforme digitali sta creando nuove forme di lavoro atipico. Questi lavoratori spesso non godono delle stesse protezioni sociali dei lavoratori tradizionali, come l'assicurazione sanitaria, la pensione o il congedo di maternità. Le politiche di welfare devono quindi essere aggiornate per includere anche queste nuove categorie di lavoratori (Sartal et al., 2020).

5.5.2 Governance e regolamentazione del lavoro digitale

Le nuove forme di lavoro digitale sollevano anche questioni di governance e regolamentazione, che devono essere affrontate con le dovute attenzioni e dedizione per garantire che i diritti dei lavoratori siano protetti. In particolare, Grybauskas et al., 2022 parlano sostanzialmente di tre punti principali:

- *Regolamentazione delle piattaforme digitali:* l'aumento delle piattaforme digitali di lavoro, come Uber o TaskRabbit per fare un esempio, richiede nuove regolamentazioni che definiscano chiaramente i diritti e le responsabilità dei lavoratori e delle piattaforme stesse. Questo include la questione della classificazione dei lavoratori come dipendenti o autonomi, che ha implicazioni significative per la loro protezione sociale.

- *Privacy e sicurezza dei dati:* con l'aumento del lavoro digitale, la protezione della privacy e della sicurezza dei dati dei lavoratori, oltre a quelli aziendali, diventa una preoccupazione centrale. Dunque, a tal proposito, le imprese e le autorità devono collaborare per garantire che i dati personali siano protetti e che le nuove tecnologie non violino i diritti fondamentali dei lavoratori.

- *Equilibrio tra innovazione e protezione sociale:* infine, le politiche devono trovare un equilibrio tra il sostegno all'innovazione e la protezione sociale. È importante che le nuove tecnologie portino

[97] International Labour Organization (ILO), 2021, *World Employment and Social Outlook 2021: The role of digital labor platforms in transforming the world of work.*

benefici a tutti, evitando che gruppi vulnerabili siano lasciati indietro o che le disuguaglianze sociali aumentino.

- *Sviluppo della cultura digitale:* l'introduzione delle tecnologie dell'Industria 4.0 richiede anche un cambiamento nella cultura aziendale, con un'enfasi maggiore sulla digitalizzazione e l'innovazione. Le imprese devono in quest'ottica promuovere una cultura che incoraggi l'innovazione continua e l'adozione delle nuove tecnologie. Questo implica non solo l'investimento in formazione, ma anche la creazione di un ambiente in cui i dipendenti sono motivati a sperimentare e a sviluppare nuove idee. Inoltre, la collaborazione tra uomini e macchine richiede una nuova mentalità, in cui i dipendenti vedono la tecnologia non come una minaccia, ma come uno strumento per migliorare il loro lavoro.

Le imprese devono quindi investire in programmi di change management e in strategie per facilitare questa integrazione, e i leader aziendali in primis devono essere in grado di guidare le loro organizzazioni attraverso la trasformazione digitale, comprendendo le potenzialità delle nuove tecnologie e promuovendo una visione chiara e condivisa del futuro digitale dell'azienda (Benotsmane et al., 2019). Soprattutto è bene che su questi aspetti socialmente critici si ponga la dovuta attenzione e che vengano menzionati e posti in rilievo, in modo da fornire maggior sensibilizzazione e consapevolezza della loro fondamentale importanza (figura 5.3).

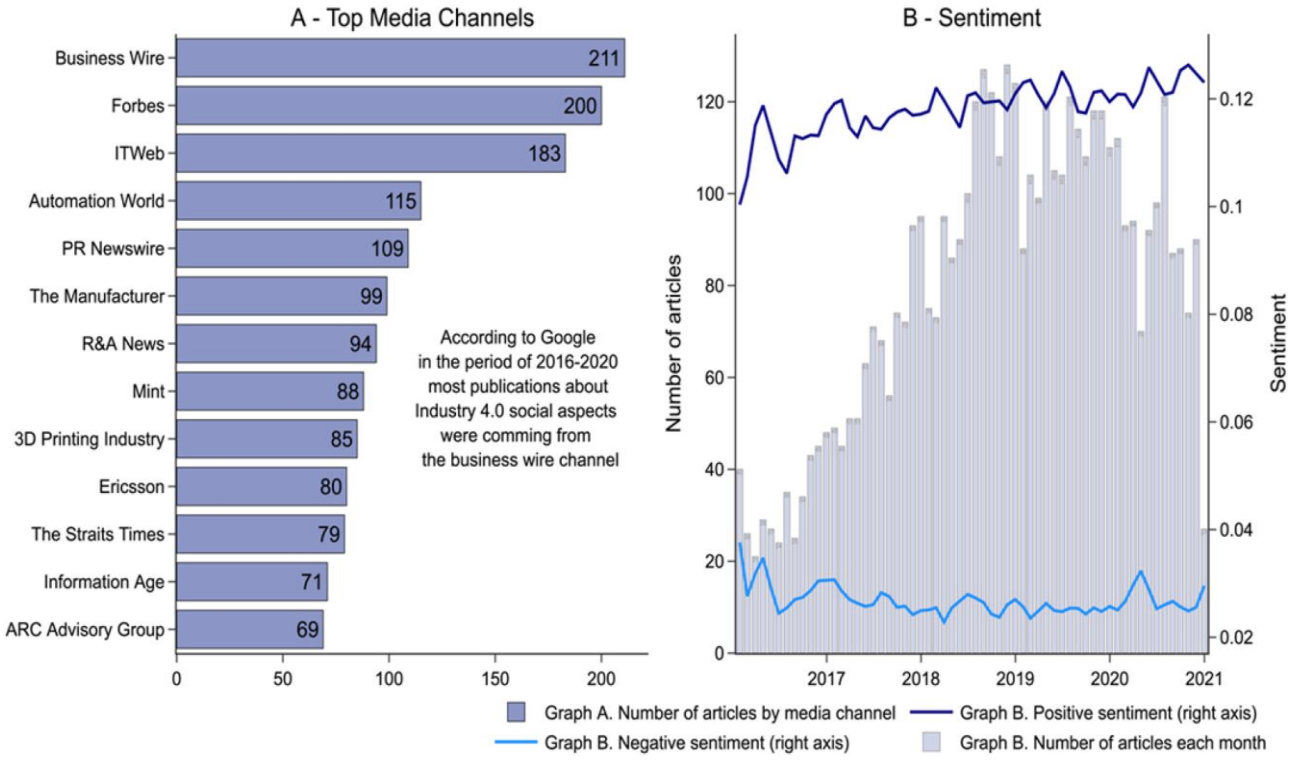

Fig. 5.3: *il grafico A rappresenta i canali mediatici che hanno parlato più attivamente degli aspetti sociali dell'Industria 4.0, mentre B raffigura gli indici di crescita e opinioni delle pubblicazioni. Fonte: Grybauskas et al., 2022.*

5.5.3 Politiche per la riqualificazione e l'apprendimento permanente

Abbiamo visto più volte che una delle principali sfide dell'Industria 4.0 è l'impatto sul mercato del lavoro, con la conseguente necessità di nuove competenze e la riduzione di posti di lavoro tradizionali. A tal proposito, Grybauskas et al. (2022) riportano che le politiche di riqualificazione e apprendimento permanente sono essenziali per preparare i lavoratori alle nuove esigenze del mercato del lavoro. I governi e le aziende devono in particolare investire in programmi di riqualificazione professionale per i lavoratori che rischiano di essere sostituiti dall'automazione, programmi che devono essere accessibili, flessibili e orientati verso le competenze richieste dai settori emergenti.

Ad esempio, la formazione nelle competenze digitali, nella programmazione e nell'analisi dei dati è cruciale per garantire che i lavoratori possano trovare nuove opportunità di lavoro. Uno studio della Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) ha dimostrato che i programmi di formazione mirata, se ben progettati, possono ridurre significativamente il rischio di disoccupazione tecnologica e migliorare la mobilità occupazionale. Soprattutto, i programmi che combinano l'istruzione formale con l'apprendimento pratico sul posto di lavoro si sono rivelati particolarmente efficaci[98]. Passando ad un altro importante aspetto che avessimo accennato in precedenza, ovverosia l'apprendimento permanente, o lifelong learning, vediamo come esso debba essere promosso come un pilastro centrale delle politiche educative. Infatti, in un contesto in cui le tecnologie e le competenze richieste cambiano rapidamente, è essenziale che i lavoratori abbiano l'opportunità di aggiornare continuamente le proprie competenze. Questo richiede un cambiamento culturale e strutturale nell'approccio all'istruzione e alla formazione, con un maggiore focus sull'apprendimento flessibile e modulare, che permetta ai lavoratori di conciliare formazione e occupazione. Secondo il report del WEF (2018) citato in precedenza, le iniziative di apprendimento permanente sono fondamentali per preparare la forza lavoro globale alle sfide dell'Industria 4.0, contribuendo a ridurre le disuguaglianze e a promuovere la crescita inclusiva.

5.5.4 Politiche di protezione sociale e lavorativa

Oltre alla riqualificazione, è necessario implementare politiche di protezione sociale e lavorativa che possano salvaguardare i diritti dei lavoratori in un'epoca di trasformazioni tecnologiche. I sistemi di protezione sociale devono essere adattati per rispondere alle nuove realtà del mercato del lavoro, e questo include l'ampliamento delle reti di sicurezza sociale per includere i lavoratori delle piattaforme digitali, i freelance e gli autonomi, che spesso non beneficiano delle protezioni tradizionali riservate ai lavoratori dipendenti. Inoltre, è fondamentale assicurare che i lavoratori abbiano accesso a un sostegno adeguato in caso di perdita del lavoro, attraverso l'introduzione di sussidi di disoccupazione, formazione e servizi di reinserimento professionale. L'International Labour Organization (ILO) ha sottolineato l'importanza di modernizzare i sistemi di protezione sociale per affrontare le sfide poste dalla digitalizzazione e dall'automazione, evidenziando la necessità di un approccio inclusivo che copra tutti i tipi di lavoro, indipendentemente dalla forma contrattuale.

[98] OECD, 2020, *Skills Outlook 2020: Learning for Life*, OECD Publishing.

Oltre a questo, dato che l'espansione delle piattaforme digitali e del lavoro remoto ha creato nuove sfide in termini di regolamentazione del lavoro, è pertanto necessario stabilire regole chiare per garantire che i lavoratori digitali abbiano accesso a condizioni di lavoro eque, protezioni contro lo sfruttamento e il diritto a un ambiente di lavoro sicuro. Questo include la regolamentazione delle condizioni di lavoro, come l'orario di lavoro, la remunerazione e la sicurezza, nonché la protezione dei dati personali dei lavoratori. La Commissione Europea, ad esempio, ha iniziato a lavorare su una serie di iniziative per regolamentare il lavoro su piattaforme digitali, con l'obiettivo di garantire la tutela dei diritti dei lavoratori e promuovere condizioni di lavoro dignitose. A tale scopo, le aziende possono adottare misure per ridurre lo stress legato alla sorveglianza e all'incertezza lavorativa, come l'introduzione di programmi di supporto psicologico, la promozione di un ambiente di lavoro sano e l'offerta di percorsi di gestione dello stress.

Inoltre, è importante che le imprese offrano trasparenza riguardo ai cambiamenti tecnologici e supportino i lavoratori nel processo di adattamento (Satyro et al., 2022). Per contrastare poi l'isolamento sociale, le aziende dovrebbero incoraggiare le interazioni tra i dipendenti, anche in un ambiente sempre più digitalizzato. Questo può includere la creazione di spazi di lavoro collaborativi, l'organizzazione di attività di team building e la promozione di una cultura aziendale che valorizzi le relazioni umane.

5.5.5 Promozione dell'inclusione digitale

Un altro aspetto cruciale delle politiche di mitigazione è la promozione dell'inclusione digitale, per evitare che il divario digitale si traduca in nuove forme di esclusione sociale ed economica. È innanzitutto essenziale che tutti i cittadini abbiano accesso alle tecnologie digitali e alle infrastrutture necessarie per partecipare pienamente alla vita economica e sociale. Questo include l'espansione dell'accesso a Internet ad alta velocità nelle aree rurali e svantaggiate, nonché l'offerta di dispositivi tecnologici a prezzi accessibili. Politiche come il *Digital Agenda for Europe* mirano a garantire che entro il 2030 tutti gli europei abbiano accesso a connessioni Internet ad alta velocità e che siano ridotte le disuguaglianze digitali.

In secondo luogo, l'alfabetizzazione digitale è fondamentale per garantire che tutti possano beneficiare delle opportunità offerte dall'Industria 4.0. I governi devono quindi investire in programmi di alfabetizzazione digitale, rivolti in particolare a gruppi vulnerabili come gli anziani, le persone a basso reddito e coloro che vivono in aree rurali. Questi programmi devono essere inclusivi e accessibili, offrendo formazione sia di base che avanzata per migliorare la capacità delle persone di utilizzare le tecnologie digitali in modo efficace (Grybauskas et al., 2022). Secondo l'Unione Internazionale delle Telecomunicazioni (ITU), l'alfabetizzazione digitale è un prerequisito per l'inclusione sociale e la partecipazione attiva nell'economia digitale, e richiede un approccio coordinato tra governi, settore privato e società civile[99].

[99] International Telecommunication Union (ITU), 2020, *Measuring Digital Development: Facts and Figures 2020.*

5.6 L'Industria 5.0

Abbiamo visto come non solo per quanto riguarda gli impatti ambientali ed economici, ma anche in ambito sociale l'avvento dell'Industria 4.0 sconvolge completamente l'intero mondo del lavoro e il modo di operare e pensare delle imprese, con un'infinità di possibili conseguenze che sono spesso difficili da analizzare, nonché da trattare. Essendo di certo presenti diversi effetti collaterali che vanno peggiorare le condizioni dell'uomo, spesso dovute alla decentralizzazione della sua figura, in questi ultimissimi anni, in particolare dal 2019-2020, ha preso piede un nuovo concetto dell'Industria 4.0, ovvero quella che viene chiamata Industria 5.0. Tuttavia, le discussioni più strutturate e formali relative a questa cosiddetta Industria 5.0 hanno preso piede nel 2021, specialmente con la pubblicazione di documenti da parte della Commissione Europea[100] e altri enti che hanno cercato di delineare cosa significhi esattamente questo nuovo paradigma industriale.

L'industria 5.0 si distingue dall'Industria 4.0 (che è centrata sulla digitalizzazione e sull'automazione tramite tecnologie come IoT, IA, cloud, e AM) per il suo focus sulla collaborazione tra uomo e macchina: mentre dunque l'Industria 4.0 si concentra sull'efficienza e la produttività, l'Industria 5.0 pone l'accento sul contributo umano, la sostenibilità e la resilienza (Nahavandi et al., 2019)[101]. Nello specifico, l'idea centrale è che l'Industria 5.0 non cerca solo di automatizzare ulteriormente i processi, ma anche di restituire un ruolo centrale all'essere umano, sfruttando le capacità uniche delle persone in collaborazione con tecnologie avanzate per creare soluzioni più personalizzate e sostenibili, come riportato nello schema di figura 5.4 di Demir et al. (2019).[102]

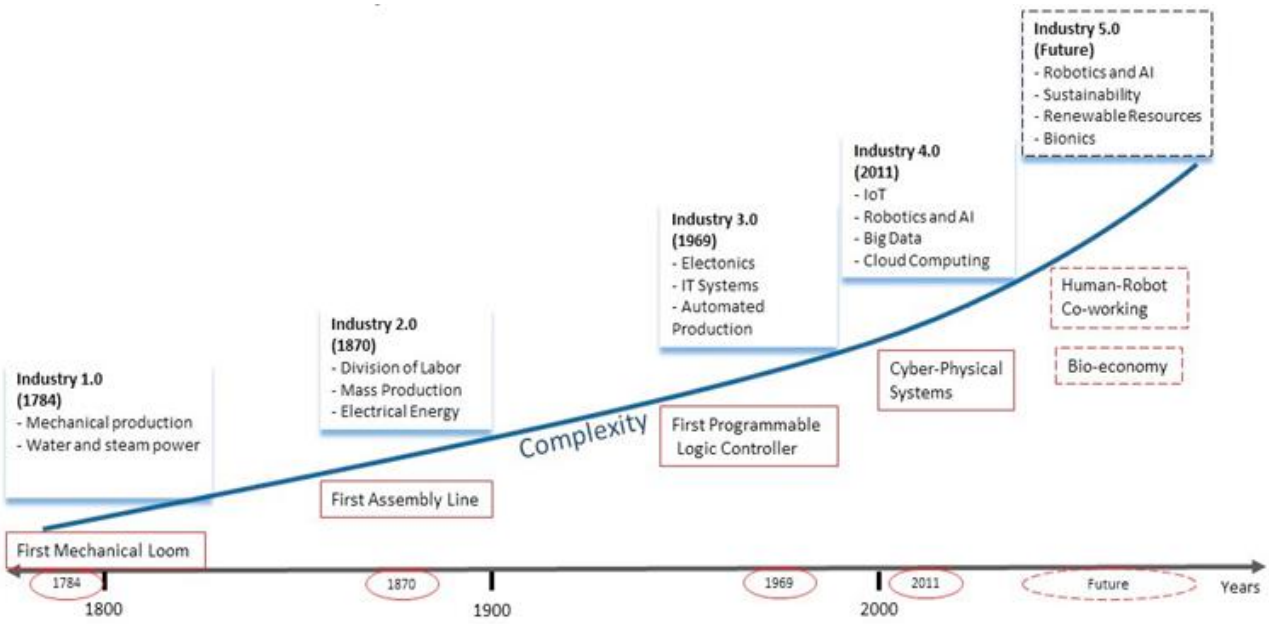

Fig. 5.4: *L'evoluzione del concetto industriale dall'800, ad oggi, e a venire nei prossimi anni. Fonte: Demir et al., 2019.*

[100] Commissione Europea, 2021, *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry.*

[101] Nahavandi S., 2019, Industry 5.0—A human-centric solution. *Sustainability*, vol. 11, n. 6.

[102] Demir K. A., Döven G., and Sezen B., 2019, Industry 5.0 and Human-Robot Co-working, *Procedia Computer Science*, vol. 158, pp. 688-695.

L'Industria 5.0 rappresenta potenzialmente dunque un grande passo avanti nell'evoluzione della rivoluzione tecnologica che ha caratterizzato l'Industria 4.0, dal momento che quest'ultima si è concentrata principalmente sull'efficienza, l'automazione e l'interconnessione dei processi produttivi, l'Industria 5.0 introduce questa nuova visione che integra la dimensione umana e sociale. Questa transizione non è solo un semplice aggiornamento tecnologico, ma anche e soprattutto un cambiamento di paradigma che risponde alle sfide e agli impatti sociali emersi con l'Industria 4.0 (Javaid et al., 2020)[103].

5.6.1 Le caratteristiche di I5.0

In questa sezione esamineremo i principali aspetti attraverso il quali si concretizza l'idea dell'Industria 5.0, evidenziando come questi si discostino, o meglio, si propongono di migliorare, i vari difetti che presenta invece l'Industria 4.0. Appellandoci agli studi Nahavandi et al. (2019) e Javaid et al. (2020), i principali punti su cui agire sono i seguenti:

- *Centralità della figura umana:* l'Industria 4.0, con la sua enfasi sull'automazione e l'intelligenza artificiale, ha sollevato preoccupazioni circa la sostituzione del lavoro umano con macchine intelligenti. Questa paura, radicata in una realtà dove molte mansioni ripetitive e persino complesse sono state automatizzate, ha portato a una diminuzione della percezione del valore del lavoro umano. I lavoratori, in alcuni casi, si sono sentiti marginalizzati, con un crescente senso di insicurezza professionale e personale. L'Industria 5.0 si propone quindi di rimediare a queste problematiche mettendo l'essere umano al centro del processo produttivo. Non si tratta più di sostituire l'uomo con la macchina, ma di creare una sinergia in cui la tecnologia potenzia le capacità umane. In questo nuovo modello, l'automazione non è vista come una minaccia, ma come uno strumento per migliorare la qualità del lavoro e la vita dei lavoratori. L'Industria 5.0 mira, di conseguenza, a un ambiente in cui la creatività, l'innovazione e l'intelligenza emotiva dell'uomo sono valorizzate e amplificate dalla tecnologia, riducendo così lo stress e migliorando il benessere psicologico dei lavoratori.

- *Personalizzazione e valorizzazione della creatività:* un'altra critica all'Industria 4.0 è stata la sua tendenza a favorire la produzione di massa, anche se personalizzata, a scapito della creatività e dell'interazione umana. La digitalizzazione ha infatti spesso ridotto i processi creativi a semplici analisi di dati, diminuendo l'importanza dell'intuizione e dell'esperienza umana, e per di più questa standardizzazione ha portato a un senso di alienazione per molti lavoratori, che hanno visto le proprie competenze artistiche e creative sminuite. Dunque, l'Industria 5.0 cerca di invertire questa tendenza, promuovendo un modello in cui la tecnologia è al servizio della creatività umana: ecco allora che la personalizzazione diventa non solo un obiettivo produttivo, ma anche un mezzo per esprimere l'unicità e l'originalità umana. Inoltre, in questo contesto, le tecnologie avanzate, come l'intelligenza artificiale e la robotica collaborativa, non sostituiscono la creatività, ma la potenziano, offrendo agli individui nuovi strumenti per esprimere le proprie idee e innovare. Questo approccio non solo migliora la qualità del prodotto finale, ma contribuisce anche a un maggiore senso di realizzazione e soddisfazione personale tra i lavoratori.

[103] Javaid M., and Haleem A., 2020, Critical components of Industry 5.0 towards a successful adoption in the field of manufacturing, *Journal of Industrial Integration and Management*, vol. 5, n. 3, pp. 327-348.

- *Sostenibilità sociale e ambientale:* come abbiamo detto all'inizio, la sostenibilità è un tema centrale nell'evoluzione dall'Industria 4.0 all'Industria 5.0. Sebbene l'Industria 4.0 abbia introdotto significativi miglioramenti in termini di efficienza e riduzione degli sprechi, essa ha spesso trascurato l'impatto sociale e ambientale delle sue innovazioni. Infatti, le tecnologie implementate hanno sì favorito una crescita economica rapida, ma allo stesso tempo con conseguenze potenzialmente dannose per l'ambiente e per la coesione sociale, come l'aumento delle disuguaglianze, per categoria, capacità e linee di pensiero. L'Industria 5.0 al contrario, adotta una visione più olistica, che integra la sostenibilità sociale e ambientale nel processo produttivo. Questo significa che le decisioni industriali non sono guidate solo dal profitto, ma anche dalla responsabilità verso le persone e il pianeta. Le aziende sono quindi incoraggiate a considerare l'impatto delle loro attività sull'ambiente e a promuovere pratiche che supportino la giustizia sociale. Questo approccio mira a creare un equilibrio tra crescita economica, benessere sociale e protezione ambientale, affrontando direttamente le preoccupazioni di esclusione sociale e degrado ambientale sollevate dall'Industria 4.0.

- *Resilienza e inclusività come obiettivi primari:* un altro elemento cruciale dell'Industria 5.0 è la costruzione di un ecosistema industriale più resiliente e inclusivo, e questo perché l'Industria 4.0 ha portato a una crescente polarizzazione del mercato del lavoro, dove l'accesso alle nuove tecnologie e alle opportunità di riqualificazione è stato spesso limitato a una parte privilegiata della popolazione. Questo ha aggravato le disuguaglianze sociali, escludendo molti lavoratori dalle opportunità create dalle nuove tecnologie. L'Industria 5.0 riconosce questa problematica e si impegna dunque a sviluppare un modello di sviluppo più equo: ciò implica non solo un miglior accesso alle tecnologie, ma anche un impegno più forte verso la formazione e la riqualificazione dei lavoratori. L'idea di fondo è che tutti possano beneficiare della trasformazione digitale, non solo un'élite tecnologicamente avanzata. Altro concetto importante è che tale inclusività non riguarda solo l'accesso alla tecnologia, ma anche la creazione di un ambiente di lavoro in cui tutti possano contribuire e prosperare, indipendentemente dal loro background sociale o dalle loro competenze tecniche.

- *Collaborazione uomo-macchina:* l'Industria 4.0 ha promosso l'automazione completa di molti processi, portando a una riduzione significativa del ruolo umano in diverse aree produttive. Questo ha sollevato preoccupazioni riguardo alla perdita di posti di lavoro e alla crescente dipendenza dalle macchine, con conseguente riduzione del controllo umano sul processo produttivo. In risposta a queste preoccupazioni, l'Industria 5.0 promuove un modello di collaborazione tra uomo e macchina, nel quale in particolare le macchine non sostituiscono gli esseri umani, ma lavorano al loro fianco, migliorando le capacità umane e aumentando l'efficienza e la qualità del lavoro. Questo tipo di collaborazione può ridurre lo stress e il burnout, aspetti che risultano comuni nell'Industria 4.0, offrendo un ambiente di lavoro più equilibrato e sostenibile, dove la tecnologia diventa un partner, e non un concorrente.

- *Etica e responsabilità nell'innovazione:* infine, l'Industria 5.0 affronta direttamente le questioni etiche emerse con l'Industria 4.0, come la privacy, la sicurezza e l'autonomia dei lavoratori. La rapida adozione di nuove tecnologie ha sollevato come sappiamo infatti diverse domande importanti riguardo al loro uso responsabile e alle implicazioni per la società. In merito a tale questione, l'Industria 5.0 si propone in particolare di sviluppare un approccio etico e responsabile all'innovazione tecnologica, in cui le tecnologie da un lato migliorano l'efficienza e al tempo stesso rispettano anche i valori umani fondamentali.

Questo include la protezione dei dati personali, la garanzia di condizioni di lavoro dignitose e la promozione di un utilizzo delle tecnologie che sia moralmente accettabile e socialmente utile. L'obiettivo è dunque garantire che l'innovazione tecnologica contribuisca al progresso sociale, piuttosto che minare i diritti e il benessere degli individui.

Tutti questi aspetti, nell'ottica di un I5.0 ancora in evoluzione, vengono riportati qui sotto in figura 5.5 sempre da Demir et al. (2019), i quali rimarcano le principali differenze con l'Industria 4.0, nonché gli aspetti su cui l'Industria 5.0 si propone di migliorare rispetto ad essa.

	Industry 4.0	**Industry 5.0 (Vision 1)**	**Industry 5.0 (Vision 2)**
Motto	Smart Manufacturing	Human-Robot Co-working	Bioeconomy
Motivation	Mass Production	Smart Society	Sustainability
Power Source	Electrical power Fossil-based fuels Renewable power sources	Electrical power Renewable power sources	Electrical power Renewable power sources
Involved Technologies	Internet of Things (IoT) Cloud Computing Big Data Robotics and Artificial Intelligence (AI)	Human-Robot Collaboration Renewable Resources	Sustainable Agricultural Production Bionics Renewable Resources
Involved Research Areas	Organizational Research Process Improvement and Innovation Business Administration	Smart Environments Organizational Research Process Improvement and Innovation Business Administration	Agriculture Biology Waste Prevention Process Improvement and Innovation Business Administration Economy

Fig. 5.5: *Le principali differenze riassunte tra l'Industria 4.0 e l'Industria 5.0. Fonte: Demir et al., 2019*

5.6.2 Conclusioni e criticità

Nonostante l'Industria 5.0 offra una visione promettente per il futuro dell'industria, esistono diverse criticità che potrebbero ostacolare la sua piena realizzazione, a partire proprio dall'integrazione uomo-macchina, ovvero il suo principale punto di forza, nonché obiettivo primario. Infatti, come abbiamo detto, uno dei principali propositi dell'Industria 5.0 è la collaborazione sinergica tra esseri umani e macchine intelligenti, ma l'integrazione efficace di questi due elementi non sarà semplice da realizzare, anzi presenta diverse complessità. La coesistenza di lavoratori umani e cobot, infatti, come rilevano Demir et al. (2019), richiede un ripensamento dei processi produttivi, che possono essere costosi e richiedono un significativo sforzo di ristrutturazione delle interfacce uomo-macchina e dei sistemi di sicurezza per garantire un ambiente di lavoro sicuro e produttivo. In particolare, le interfacce uomo-macchina devono essere progettate per facilitare un'interazione intuitiva tra l'operatore umano e le macchine: questo include la progettazione di interfacce che siano facili da usare, riducano la possibilità di errori e permettano agli operatori di prendere decisioni informate. La complessità di queste interfacce può rappresentare una barriera, specialmente per i lavoratori meno esperti con le tecnologie digitali avanzate. Oltre a questo, Demir et al. (2019) rimarcano la questione relativa alla coesistenza di esseri umani e macchine intelligenti in ambienti produttivi, che pone serie questioni di sicurezza.

I cobot sono progettati per operare fianco a fianco con gli esseri umani, ma è fondamentale garantire che possano farlo senza rischi. Questo implica l'adozione di sensori avanzati, algoritmi di prevenzione delle collisioni e meccanismi di arresto automatico in caso di pericolo. Tuttavia, la gestione di questi sistemi complessi può risultare difficile e richiede un aggiornamento continuo delle normative di sicurezza.

In più, per un'integrazione efficace, le macchine devono essere in grado di comunicare non solo tra loro, ma anche con gli esseri umani, e ciò richiede lo sviluppo di sistemi di comunicazione avanzati che possano interpretare e rispondere ai comandi umani in modo flessibile e preciso (Nahavandi et al., 2019). Si rammenta inoltre che l'introduzione di cobot e IA può generare resistenze tra i lavoratori, soprattutto se percepiti come una minaccia al loro impiego o se i lavoratori non si sentono a loro agio con la tecnologia. È cruciale coinvolgere i dipendenti nel processo di implementazione, fornendo formazione adeguata e promuovendo una cultura aziendale che valorizzi la collaborazione uomo-macchina. La mancata gestione di queste dinamiche può portare a un ambiente di lavoro conflittuale, minando l'efficacia delle nuove tecnologie (Demir et al., 2019).Non dimentichiamo poi che l'Industria 5.0 richiede una forza lavoro altamente qualificata, capace di interagire con le tecnologie 4.0, e questo pone una sfida significativa per i sistemi educativi e formativi, che devono adattarsi rapidamente per fornire le competenze necessarie, poiché il rischio è che il divario di competenze possa aumentare, creando disuguaglianze nel mercato del lavoro. Nahavandi et al. (2019) e Javaid et al. (2020) riportano in aggiunta che nonostante l'Industria 5.0 promuova la sostenibilità sociale, l'implementazione delle tecnologie necessarie può comportare costi elevati, sia in termini di investimenti iniziali sia di gestione operativa. Le piccole e medie imprese (PMI), in particolare, potrebbero incontrare difficoltà nell'adottare queste nuove tecnologie, rischiando di rimanere indietro rispetto alle grandi imprese.

Come se non bastasse, ricordiamo anche che la crescente automazione e l'uso di intelligenza artificiale purtroppo ma anche giustamente sollevano molte preoccupazioni riguardo alla perdita di posti di lavoro e al cambiamento delle dinamiche occupazionali. Sebbene l'Industria 5.0 miri a creare un equilibrio tra tecnologia e lavoro umano, l'effetto netto sull'occupazione è ancora incerto, dal momento che si tratta di un concetto estremamente recente e per cui non ha ancora avuto modo di svilupparsi e concretizzarsi in modo appropriato, e potrebbe richiedere l'adozione di politiche di protezione sociale e riqualificazione professionale, senza contare la criticità relativa all''utilizzo esteso di dati e intelligenza artificiale, che solleva questioni etiche riguardanti la privacy e la sorveglianza. La raccolta e l'analisi di grandi quantità di dati difatti possono portare a rischi di abuso e violazione della privacy, richiedendo una regolamentazione rigorosa e trasparente per proteggere i diritti dei lavoratori e dei consumatori (Javaid et al., 2020).

L'Industria 5.0 rappresenta dunque una nuova frontiera nello sviluppo industriale, capace di ridefinire il rapporto tra uomo e tecnologia. A differenza dei paradigmi precedenti, che hanno privilegiato la massimizzazione dell'efficienza e l'automazione dei processi, l'Industria 5.0 si distingue per il suo approccio umano centrico, sostenibile e resiliente. Questa transizione si configura non come una mera evoluzione tecnologica, ma come una trasformazione culturale che pone l'essere umano al centro del processo produttivo, valorizzandone le capacità creative e intellettuali. L'integrazione armoniosa tra le tecnologie avanzate, come l'intelligenza artificiale e la robotica collaborativa, e il contributo umano, diventa il fulcro di un'industria che mira non solo alla produttività, ma anche al benessere sociale e ambientale.

Le sfide legate alla sostenibilità e alla resilienza, emerse con sempre maggiore urgenza negli ultimi anni, trovano nell'Industria 5.0 un terreno fertile per lo sviluppo di soluzioni innovative che possano coniugare crescita economica e responsabilità sociale. In conclusione, l'Industria 5.0 non è quindi solo una risposta alle esigenze di un mercato globale in rapido cambiamento, ma rappresenta un'opportunità unica per ripensare i modelli industriali del futuro.

Tabella 6.2: *Sintesi degli impatti sociali positivi e negativi di I4.0.*

Aree di impatto	Descrizione	Effetti Negativi	Effetti Positivi
Lavoro e Occupazione	Automazione e digitalizzazione dei processi produttivi.	Perdita di posti di lavoro nelle mansioni ripetitive e manuali; crescita della disoccupazione tecnologica.	Aumento della produttività; nuove opportunità lavorative in settori tecnologici avanzati.
Formazione e Competenze	Necessità di nuove competenze digitali e tecniche per adattarsi ai cambiamenti.	Esclusione dei lavoratori meno qualificati; gap di competenze tra lavoratori.	Creazione di percorsi di formazione e riqualificazione professionale; crescita di nuove figure professionali.
Disuguaglianze Sociali	Polarizzazione del mercato del lavoro e accesso disomogeneo alle tecnologie.	Aumento delle disuguaglianze economiche e sociali; concentrazione della ricchezza.	Potenziale democratizzazione dell'accesso alle tecnologie per chi riceve formazione adeguata.
Benessere Psicologico	Cambiamenti nei ritmi e nelle modalità lavorative.	Stress lavorativo, burnout, alienazione causati dall’automazione e dalla mancanza di controllo umano.	Miglioramento della qualità della vita attraverso flessibilità lavorativa e supporto tecnologico.
Relazioni Sociali	Trasformazione del modo di interagire sul lavoro e nella vita quotidiana.	Riduzione dell'interazione umana diretta; isolamento e riduzione delle connessioni personali.	Comunicazioni più rapide e immediate; possibilità di collaborazioni globali grazie alle tecnologie.
Accesso ai Servizi	Digitalizzazione di servizi pubblici e privati (sanità, banche, ecc.).	Esclusione digitale per chi non ha accesso o competenze sufficienti per usare la tecnologia.	Migliore accesso a servizi online, riduzione dei tempi di attesa e maggiore efficienza.
Cultura e Stili di Vita	Impatto dell’iperconnessione e dei nuovi modelli di consumo.	Riduzione dell’attenzione e difficoltà a disconnettersi dal lavoro e dalle tecnologie.	Aumento delle opportunità di intrattenimento e personalizzazione delle esperienze di consumo.
Etica e Privacy	Espansione del monitoraggio digitale e raccolta massiva di dati personali.	Violazione della privacy, sorveglianza costante, uso improprio dei dati personali.	Potenziale miglioramento della sicurezza e personalizzazione dei servizi attraverso i dati

6 CAPITOLO 6: GLI IMPATTI ORGANIZZATIVI E VISIONE DI INSIEME DEL CONTESTO 4.0

6.1 Premesse

In quest'ultimo capitolo ci occuperemo di valutare gli impatti organizzativi dell'Industria 4.0 in modo da comprendere anche le conseguenze e i cambiamenti che attraversano le aziende e tutto il mondo dell'industria e del lavoro in una macro-visione generale. Questo è assolutamente essenziale perchè questa rivoluzione tecnologica non si limita a introdurre nuove tecnologie, ma coinvolge profondamente le strutture organizzative, i processi, le competenze e le dinamiche aziendali. Ecco perché è importante considerare una vasta gamma di aspetti, dalla riorganizzazione dei processi aziendali, l'impatto sulle competenze e formazione del personale, il cambiamento nella cultura aziendale e la relativa gestione, il come avviene l'integrazione delle tecnologie 4.0, gli impatti sull'occupazione, il rapporto tra innovazione e competitività, la sostenibilità e responsabilità sociale. Dunque, la valutazione degli impatti organizzativi dell'Industria 4.0 è fondamentale per garantire che le imprese possano adattarsi con successo a questa trasformazione tecnologica, sfruttandone appieno le opportunità senza incorrere in rischi o inefficienze.

In questo capitolo ci concentreremo dapprima sulla supply chain, esaminando come l'integrazione delle tecnologie avanzate 4.0 e dei sistemi di automazione abbia incrementato l'efficienza, migliorato la trasparenza e ridotto i tempi di risposta lungo la catena del valore.

Successivamente, affronteremo la trasformazione del lavoro e del lavoratore, analizzando come l'automazione e l'intelligenza artificiale stiano ridefinendo le competenze richieste e introducendo nuovi modelli di collaborazione tra uomo e macchina. Questa sezione discuterà come i lavoratori debbano adattarsi ai cambiamenti e sviluppare nuove competenze digitali per restare competitivi e come il concetto di lavoro stesso stia evolvendo verso una dimensione più dinamica e tecnologica.

Il capitolo proseguirà con una sezione sul Product Lifecycle, esplorando le innovazioni nei processi di sviluppo e gestione del ciclo di vita del prodotto. L'adozione di strumenti digitali infatti permette oggi di monitorare ogni fase del ciclo di vita, dalla progettazione alla produzione e, infine, allo smaltimento, promuovendo così la sostenibilità e l'ottimizzazione delle risorse.

Infine, concluderemo con un'analisi delle iniziative europee e italiane nel campo dell'Industria 4.0, evidenziando le politiche di supporto alla digitalizzazione delle imprese. Particolare attenzione sarà rivolta alle iniziative promosse dall'Unione Europea, come Horizon 2020 e Next Generation EU, nonché alle politiche italiane per incentivare l'adozione delle tecnologie emergenti, con esempi di programmi e incentivi che favoriscono la crescita e la competitività delle aziende italiane.

6.2 Ottimizzazione della Supply Chain

Nel panorama 4.0 abbiamo detto che si verificano impatti profondi anche sulla supply chain, poiché essa viene ottimizzata attraverso l'uso di tecnologie avanzate che migliorano la visibilità, l'efficienza, la tracciabilità e la gestione delle risorse lungo l'intero processo, dal fornitore al cliente finale. È così dunque che viene introdotto il concetto di "supply chain digitale", in cui tutti gli attori coinvolti (fornitori, produttori, distributori e clienti) sono interconnessi tramite piattaforme digitali, e dove le informazioni vengono scambiate in tempo reale, migliorando la visibilità e la trasparenza lungo l'intera catena di fornitura, come avremo modo di approfondire in questa sezione.

6.2.1 Le caratteristiche della nuova Supply Chain

Per illustrare in cosa consiste questa nuova catena di approvvigionamento ci appelliamo allo studio minuzioso di Ivanov et al. (2019)[104]. L'uso di sensoristica e sistemi di tracciabilità avanzati, ed in più la blockchain consentono di monitorare ogni fase della produzione e distribuzione, riducendo il rischio di errori e frodi. L'integrazione di tecnologie innovative, soprattutto riferendoci all'intelligenza artificiale, all'IoT, alla blockchain e ai sistemi ERP, trasforma la supply chain in una rete altamente interconnessa e adattabile, capace di rispondere alle esigenze dinamiche del mercato globale.

Ne consegue dunque che l'adozione delle tecnologie Smart Factory permette alle aziende non solo di gestire la supply chain in modo più efficiente, ma anche di ridurre significativamente i costi operativi, migliorare la qualità dei prodotti e, al contempo, aumentare la soddisfazione dei clienti.

Questi obiettivi vengono raggiunti attraverso l'automazione, l'analisi dei dati e la digitalizzazione dei processi, che insieme creano una supply chain più reattiva, agile e competitiva. Innanzitutto, la logistica intelligente rappresenta uno degli elementi chiave di questa trasformazione. Grazie all'uso dei sensori IoT, è possibile nello specifico monitorare in tempo reale le condizioni dei beni in transito, inclusi parametri cruciali come la temperatura, l'umidità e la posizione geografica. Questo monitoraggio costante non solo migliora la gestione delle scorte, ma riduce anche il rischio di danneggiamenti, assicurando che i prodotti arrivino a destinazione in condizioni ottimali. L'implementazione di IoT nei veicoli di trasporto consente, inoltre, sempre secondo Ivanov et al. (2019), di ottimizzare i percorsi di consegna in base alle condizioni del traffico, riducendo così i tempi di consegna e i costi di carburante. Questi miglioramenti nella logistica non solo riducono i costi operativi, ma contribuiscono anche a ridurre l'impatto ambientale, promuovendo una supply chain più sostenibile.

In aggiunta, la trasparenza e la tracciabilità lungo la supply chain sono state significativamente migliorate grazie all'uso della blockchain e dei sistemi ERP integrati. Da un lato, la blockchain crea un registro sicuro e immutabile di tutte le transazioni lungo la catena di approvvigionamento, riducendo il rischio di frodi e migliorando la fiducia dei consumatori. La tracciabilità end-to-end, resa possibile dalla blockchain, permette di seguire i prodotti dal fornitore al consumatore finale, garantendo la qualità e la conformità dei prodotti alle normative vigenti.

[104] Ivanov D., Dolgui A. and Sokolov B., 2019, The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics*, International Journal of Production Research*, vol. 57, n. 3.

Questo è particolarmente importante nei settori regolamentati, come quello alimentare e farmaceutico, dove la sicurezza e la trasparenza sono fondamentali. Dall'altro lato, i sistemi ERP integrati offrono poi una visibilità centralizzata e in tempo reale di tutte le attività della supply chain, migliorando la coordinazione e la gestione delle risorse. Questo approccio ottimizza i livelli di inventario, riduce i costi di stoccaggio e garantisce che i prodotti siano sempre disponibili quando necessario, migliorando l'efficienza operativa e riducendo gli sprechi. Inoltre, la gestione delle scorte all'interno degli ERP è essenziale per evitare interruzioni nella produzione, garantendo una continuità operativa che è cruciale in un mercato altamente competitivo.

Non possiamo dimenticare che l'analisi dei Big Data e l'intelligenza artificiale (IA) rappresentano strumenti chiave per l'ottimizzazione dei processi all'interno della supply chain. Difatti, l'analisi dei dati storici e in tempo reale consente previsioni più accurate della domanda, migliorando la pianificazione della produzione e riducendo i costi di magazzino. Ivanov et al. (2019) evidenziano come tali tecnologie permettono di identificare inefficienze nei processi della supply chain, facilitando l'implementazione di soluzioni migliorative. Oltre a questo, l'IA, attraverso il Machine Learning, ottimizza ulteriormente la supply chain analizzando i dati di vendita e di approvvigionamento per abbinare in modo efficiente domanda e offerta, con una conseguente riduzione degli sprechi e un miglioramento della disponibilità dei prodotti. L'IA può anche automatizzare vari processi della supply chain, come la gestione degli ordini, il riassortimento delle scorte e la gestione delle relazioni con i fornitori, migliorando l'efficienza operativa e riducendo gli errori umani. Questa automazione consente alle aziende di reagire più rapidamente ai cambiamenti del mercato, mantenendo un alto livello di competitività.

6.2.2 La gestione a livello macroscopico

Ora, andando oltre ad una visione dettagliata dei singoli aspetti, è interessante se non fondamentale considerare il quadro d'insieme. Macroscopicamente parlando, la collaborazione e l'integrazione tra i diversi attori della supply chain sono migliorate grazie all'uso di piattaforme di collaborazione digitale e all'automazione dei processi di business (Business Process Automation, BPA), ovverosia particolari piattaforme che consentono la condivisione in tempo reale di informazioni critiche, migliorando la trasparenza e la coordinazione tra i partner commerciali. Ciò facilita anche la gestione delle relazioni con i fornitori, assicurando una maggiore qualità e puntualità nelle forniture. In più, l'automazione caratteristica dei processi di business, resa possibile dalla BPA, riduce i tempi di elaborazione e aumenta significativamente l'efficienza, in quanto i flussi di lavoro lungo la supply chain vedono un grado sempre maggiore di automazione. Questo processo di automazione riduce gli errori umani nei processi amministrativi e operativi, migliorando la precisione e l'affidabilità delle operazioni. In più, la BPA contribuisce a creare una supply chain più snella, efficiente e reattiva alle esigenze del mercato, rendendo le aziende più resilienti e pronte a fronteggiare le sfide globali, come descritto da un report dell'OECD (2019)[105].

[105] OECD, 2019, *Occupational mobility, skills and training needs*, OECD Publishing.

Un aspetto fondamentale da considerare, che non va mai trascurato, è quello relativo alla sicurezza e alla conformità. Questi elementi, oltre ad essere garantiti da tecnologie avanzate di cybersecurity, sono supportati anche dai Sistemi di Gestione della Qualità (Quality Management Systems, QMS). L'integrazione dei QMS con la supply chain, infatti, assicura che tutti i processi rispettino gli standard di qualità, portando ad un miglioramento della conformità e della soddisfazione del cliente. Questi sistemi permettono inoltre di tracciare la qualità dei prodotti lungo tutta la supply chain, assicurando che i problemi vengano identificati e risolti rapidamente. Grazie ai QMS, le aziende possono poi garantire prodotti di alta qualità, conformi alle specifiche richieste e alle normative, il che è essenziale per mantenere la fiducia dei clienti e proteggere la reputazione del brand. La combinazione di cybersecurity e QMS non solo tutela, dunque, l'integrità dei dati e delle operazioni, ma contribuisce anche a migliorare l'efficienza operativa, creando una supply chain sicura e conforme alle normative globali (IZA World of Labor, 2014)[106].

L'insieme degli attori e degli aspetti della Supply Chain digitale ed il loro coordinamento sono di seguito riportati e schematizzati in figura 6.1., dove vengono distinte in sezioni le varie tipologie delle Supply Chain e da che ciclo sono caratterizzate.

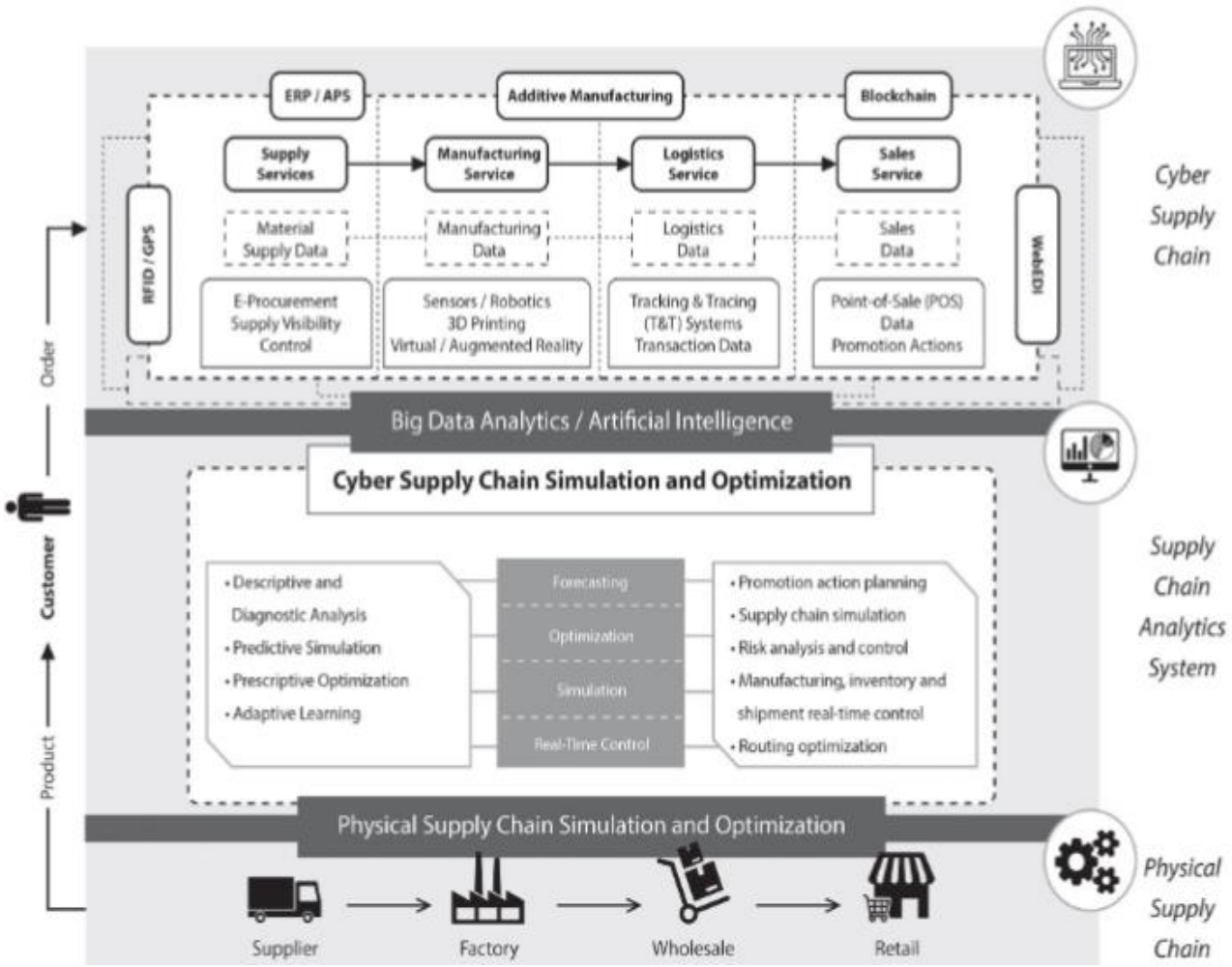

Fig. 6.1: *Coordinamento del flusso di servizi e materiali nella Supply Chain cyber-fisica. Fonte: Ivanov et al., 2019.*

[106] Iza World of Labour, 2014, *Youth labor market interventions.*

Detto questo, è pur vero che nonostante l'Industria 4.0 offra numerosi benefici per la supply chain, ma ci sono, come riportano Ivanov et al. (2019), anche alcuni potenziali svantaggi e sfide che devono essere doverosamente presi in considerazione, primi fra tutti gli alti costi di implementazione. Infatti, l'adozione delle tecnologie 4.0 richiede come abbiamo già detto investimenti significativi in infrastrutture tecnologiche, formazione del personale e aggiornamento dei sistemi esistenti. Le innovazioni tecnologiche come sappiamo richiedono competenze tecniche avanzate, modificando i ruoli tradizionali all'interno della supply chain. La crescente integrazione di sistemi digitali e automatizzati ha portato a una riorganizzazione delle risorse umane, con la necessità di formare il personale su nuove competenze legate all'uso di tecnologie come l'analisi dei dati e la gestione delle piattaforme digitali. Le piccole e medie imprese (PMI), in particolare, possono trovare difficile sostenere questi costi iniziali, il che può rallentare l'adozione su larga scala di queste tecnologie.

Oltre a questo, la crescente dipendenza da sistemi digitali e automatizzati rende la supply chain vulnerabile a guasti tecnici, interruzioni di rete o ancor peggio ad attacchi informatici. Talvolta accade non così di rado che un'interruzione nei sistemi IT, come un attacco ransomware, possa causare gravi disagi e fermare completamente le operazioni della supply chain, con ovviamente conseguenze a dir poco catastrofiche. In più, l'aumento della connettività e la condivisione di dati sensibili lungo la supply chain aumentano il rischio non solo di violazioni della sicurezza, ma anche della privacy, e anche se certamente questo comporta la scelta obbligata per le aziende di investire in soluzioni di cybersecurity avanzate per proteggere i dati, queste potrebbero non essere sufficienti a garantire una sicurezza totale. Da non dimenticare che inoltre l'implementazione di tecnologie come IoT e Big Data genera enormi quantità di dati che devono essere gestiti, analizzati e protetti. La gestione di questi dati richiede risorse specializzate e può diventare complicata, specialmente se non ci sono sistemi adeguati per integrare e analizzare i dati in tempo reale. Secondo Ivanov et al. (2019), occorre considerare inoltre un altro aspetto importantissimo oltre a tutto questo, ossia il fatto che l'automazione e l'introduzione di nuove tecnologie possono incontrare diverse resistenze da parte dei dipendenti, principalmente dovute alla loro legittima preoccupazione per la perdita del proprio lavoro. Infatti, sebbene l'Industria 4.0 possa creare nuove e variegate opportunità di lavoro, specialmente nei settori tecnologici, può anche portare alla sostituzione di lavori manuali e routinari, con conseguenze sociali abbastanza significative. Altra sfida assolutamente non di poco conto è rappresentata dall'interoperabilità tra le diverse tecnologie e i sistemi adottati dalle aziende lungo la supply chain, che diviene talvolta un'incognita difficile da gestire, poiché la mancanza di standardizzazione può portare a inefficienze e difficoltà nell'integrazione dei sistemi, ostacolando il pieno potenziale dell'Industria 4.0.Infine, benché l'Industria 4.0 promuova spesso soluzioni sostenibili, l'aumento della produzione di dispositivi IoT, server per il cloud computing e altre tecnologie può aumentare il consumo di risorse naturali e l'impatto ambientale, specialmente in assenza di adeguate pratiche di riciclaggio e smaltimento.

6.3 La trasformazione di lavoro e lavoratore

L'Industria 4.0 ha il potenziale di rivoluzionare il concetto tradizionale di lavoro, con un impatto significativo sul suo mercato, sull'organizzazione aziendale e sui dipendenti. Al centro di questo nuovo cambiamento ci saranno principalmente da un lato una nuova concezione del lavoro stesso,

dall'altro, una ridefinizione di elementi come le competenze richieste, i luoghi e gli orari di lavoro. Come abbiamo avuto modo di discutere e come approfondiremo in questa sezione, gran parte degli elementi che caratterizzano il lavoratore stanno subendo modifiche, dal potere decisionale alla distinzione tra tempo lavorativo e tempo libero, al livello di competenze richieste, fino alla struttura salariale.

6.3.1 Un cambiamento sempre più prorompente: tra flessibilità e responsabilità maggiori

L'introduzione delle nuove tecnologie da parte delle imprese, in molti casi, cambia il modo in cui vengono svolte le attività lavorative dall'uomo, a volte sostituendolo completamente, come nel caso degli AGV. Tuttavia, l'impatto dell'automazione non è uniforme su tutti i lavori, variando in base alle caratteristiche del settore: in alcuni ambiti, come l'elaborazione dei dati o i lavori fisici, le macchine possono sostituire facilmente l'uomo, mentre in altri, dove sono necessarie competenze relazionali o capacità di comprendere emozioni e adattarsi, l'intervento umano resta imprescindibile. In generale, ambienti stabili e con attività ripetitive sono più facilmente automatizzabili rispetto a contesti dinamici che richiedono pensiero critico (McKinsey Global Institute study, 2017)[107]. Con l'integrazione dell'automazione, il ruolo del dipendente cambia: esso, infatti, non è più incentrato sull'esecuzione di compiti fisici o ripetitivi, bensì ora è orientato verso una maggiore responsabilità. Ci si aspetta dunque che i lavoratori siano più autonomi, capaci di collaborare in team, di ricoprire ruoli diversi e di affrontare problemi in modo creativo, piuttosto che limitarsi a eseguire compiti predefiniti. Questo implica che le aziende hanno ora bisogno di figure competenti, capaci di risolvere eventuali problemi tecnici legati ai macchinari e ai sistemi informatici, e ciò costituisce una questione non da poco. Inoltre, anche se grazie all'automazione e alla possibilità di monitorare e controllare da remoto le apparecchiature intelligenti, i lavoratori avranno più flessibilità e saranno in grado di gestire il loro tempo lavorativo con maggiore libertà, riducendo la rigidità di luoghi e orari, non dimentichiamo che ciò può portare ad alienazione e perdita di focus o perfino ansia (Avogaro et al., 2019)[108]. Il lavoro, quindi, diventa sempre più flessibile, con la gestione delle mansioni da remoto che si sta affermando come la nuova normalità. Questi cambiamenti nelle modalità e nei tempi di lavoro avvengono parallelamente alla trasformazione del mondo del lavoro nel suo insieme. Il valore aggiunto di ogni singolo lavoratore sarà allora misurato in base alla capacità di raggiungere obiettivi personali, con una conseguente personalizzazione delle retribuzioni. Tuttavia, anche il fatto di non sentirsi più parte “della massa” e non essere ad essa omologati può risultare talvolta motivo di stress e senso di smarrimento, che possono sfociare in problemi psicologici di portata ancora maggiore. Avogaro et al. (2019) riportano che un ulteriore effetto importante è il passaggio a una struttura aziendale più orizzontale, in cui non ci sono più rigide gerarchie, ma una maggiore interazione e flessibilità tra i vari reparti e tra i dipendenti stessi, che collaborano su progetti diversi mettendo in mostra le loro abilità, ed è proprio per questo che si tende ad attribuire al lavoro nell'era 4.0 la caratteristica di essere fluido, poiché vengono superati i confini tradizionali tra diverse mansioni.

[107] McKinsey Global Institute, 2017, *A Future That Works: Automation, Employment, and Productivity.*

[108] Avogaro M., 2019, The Highest Skilled Workers of Industry 4.0: New Forms of Work Organization for New Professions. A Comparative Study, *E-Journal of International and Comparative*, vol. 8, n. 1.

In questo contesto, il ruolo del lavoratore diventa centrale: deve essere capace di gestire le incertezze del processo produttivo, che spesso non ha una definizione precisa di compiti e ruoli, per cui questo richiede competenze e conoscenze aggiuntive. Perché l'Industria 4.0 possa davvero decollare e concretizzare i suoi punti di forza, è fondamentale come abbiamo visto investire nella formazione, poiché i dipendenti devono essere in grado di utilizzare macchinari altamente specializzati e di analizzare i dati che essi producono, oltre a dover essere in possesso di altre skills aggiuntive, che esamineremo fra poco. Oltre a ciò, l'Industria richiede una maggiore capacità di adattamento alle diverse mansioni all'interno della fabbrica e la capacità di lavorare in collaborazione con altri professionisti. È essenziale, dunque, che la figura dell'operaio avanzato sia caratterizzata da proattività.

Ovviamente, si sottolinea che la presenza di tecnologie avanzate richiede anche una riconfigurazione dell'attività di ingegneria, poiché a differenza dell'operaio, l'ingegnere si muove nei vari reparti e deve saper interagire con i colleghi per condividere conoscenze e discutere delle innovazioni in corso. Questi cambiamenti, come rimarca uno studio della McKinsey Global Institute del 2017[109], hanno un impatto positivo sulla posizione del lavoratore, in particolare sull'operaio avanzato, che vede aumentare le proprie responsabilità e ruoli rispetto al passato. Infine, il paradigma dell'Industria 4.0 potrà esprimere tutto il suo potenziale solo considerando il contributo congiunto delle generazioni junior e senior all'interno dell'azienda. Se valorizzati insieme, le competenze tecnologiche dei giovani e l'esperienza dei più anziani potranno dare vita a una forza lavoro più stabile, compatta e completa, in grado di affrontare con successo le sfide future.

6.3.2 Competenze del lavoratore 4.0

È fondamentale sottolineare come la trasformazione digitale delle imprese non coinvolga soltanto le tecnologie innovative, ma che la componente umana abbia un ruolo chiave, che non deve essere trascurato. Questo vale tanto nella fase di transizione quanto in quella di monitoraggio degli obiettivi aziendali, poiché le tecnologie non sono ancora in grado di sostituire qualità tipiche dell'uomo, come l'empatia e il pensiero critico, senza contare che è assolutamente fondamentale che questa transizione 4.0 avvenga per gradi (Avogaro et al., 2019). Al fine di sfruttare appieno i benefici offerti dall'Industria 4.0, è essenziale comprendere i cambiamenti che la digitalizzazione introduce nelle imprese e possedere le competenze e gli strumenti necessari per affrontarli. L'impresa è costituita da un insieme di risorse materiali, processi e, soprattutto, risorse umane, la cui gestione è uno degli aspetti più delicati, insieme all'automazione dei processi e all'introduzione o aggiornamento degli asset. Le aziende devono quindi rinnovarsi su più fronti, adottando nuovi modelli organizzativi e adattando le risorse umane, identificando quelle dotate delle competenze digitali necessarie. La formazione continua rimane un fattore cruciale per migliorare la capacità di adattamento dell'impresa ai costanti cambiamenti e alle pressioni esterne, permettendo di anticipare nuove esigenze e rivoluzioni, che nel mondo digitale avvengono con rapidità. Un ruolo centrale è svolto ancora una volta dalle scuole e dalle università, che devono preparare gli studenti a sviluppare le competenze necessarie per affrontare efficacemente la trasformazione digitale.

[109] McKinsey Global Institute, 2017, *What the future of work will mean for jobs, skills, and wages: Jobs lost, jobs gained*.

Una conseguenza naturale, che i lavoratori stessi si pongono, riguarda la possibile riduzione, ma anche la creazione, di posti di lavoro in un contesto dove alcuni ruoli si stanno esaurendo, mentre nuovi ne emergono in risposta all'acquisizione di nuove abilità, ed il rischio è che tutta questa velocità evolutiva possa superare e perciò travolgere quella dell'adattabilità umana (McKinsey Global Institute study, 2018)[110]. Le tecnologie digitali stanno ridisegnando la figura dell'operaio, che, come si spiegava in precedenza, non sarà più incaricato di svolgere mansioni ripetitive e standardizzate. Questo comporta una riduzione dell'importanza delle cosiddette competenze tecniche o "hard skills", legate al know-how specifico, a favore di un aumento delle competenze trasversali o "soft skills", come la capacità di lavorare in gruppo, di comunicare efficacemente, di risolvere problemi, oltre a qualità come empatia e intelligenza emotiva. L'integrazione di queste soft skills accelera i tempi di progettazione e controllo.

Dunque, dal momento che il mondo del lavoro sta cambiando profondamente rispetto al passato e, di conseguenza, anche le competenze richieste ai lavoratori, riproponiamo di seguito una tipologia di suddivisione dei livelli di competenza dei lavoratori in tre categorie principali illustrata da uno studio del McKinsey Global Institute del 2017[111], le quali subiranno variazioni significative in futuro, soprattutto a causa del passaggio dei lavoratori da una categoria all'altra. Queste tre categorie sono:

1) *High-skill workers*, sono coloro che lavorano a stretto contatto con la tecnologia, in modo complementare, i quali saranno maggiormente avvantaggiati grazie alla digitalizzazione poiché vedranno un forte aumento nella loro domanda in quanto saranno risorse essenziali per le imprese che abbracceranno la filosofia 4.0;

2) *Middle-skill workers*, saranno la categoria più a rischio in quanto le loro competenze standard possono facilmente essere sostituite e automatizzate con i macchinari. I *middle workers* dovranno scegliere se riqualificarsi, incrementando le loro skills per diventare lavoratori *high-skill* oppure svalutare le loro competenze ed essere considerati lavoratori della categoria inferiore;

3) *Low-skill workers*, i quali offrono servizi e si interfacciano direttamente con i clienti. Questa categoria subirà solo indirettamente gli effetti della digitalizzazione in quanto aumenterà il suo numero, poiché i lavoratori con skill intermedie che non si riqualificheranno finiranno in questa categoria, aumentando l'offerta di *low-skill workers* e riducendo di conseguenza il salario.

Dopo queste premesse, ci proponiamo di vedere ora nel dettaglio quali sono le competenze che vengono richieste al lavoratore 4.0 da parte delle imprese. A tal proposito, essendo questa una questione non affatto banale, ci sono stati molti studi per cercare di fare chiarezza in merito a questo interrogativo. In particolare, secondo un sondaggio svolto da *Idea Management Human Capital*, le competenze che emergono sono le seguenti:

- *Visione strategica*: consiste nel definire le linee guida che l'impresa dovrà seguire per raggiungere gli obiettivi stabiliti;

[110] McKinsey Global Institute, 2018, *How will automation affect jobs, skills, and wages?* McKinsey & Company.

[111] McKinsey Global Institute, 2017, *Jobs Lost, Jobs Gained: Workforce Transitions in a Time of Automation*. McKinsey & Company.

- *Analisi prospettica*: abilità di esaminare la situazione attuale dell'azienda, ricavando tutte le informazioni utili per intraprendere il percorso più adatto da seguire;
- *Pensiero sistemico*: capacità di comprendere e gestire le relazioni di causa-effetto tra le diverse variabili e situazioni aziendali;
- *Gestione dei team di lavoro*: capacità di comunicare in modo efficace per creare relazioni positive e motivare il gruppo di lavoro;
- *Adattabilità*: competenza che permette di adeguarsi rapidamente ai cambiamenti della fabbrica digitale;
- *Capacità di gestire e risolvere conflitti*: abilità di affrontare e risolvere le controversie che possono avere effetti negativi sull'impresa, trasformandole in occasioni di confronto costruttivo e utile per la crescita aziendale.

La ricerca svolta dal World Economic Forum (2018) trova fondamento nello studio precedentemente esaminato. Infatti, in questo report, il problem solving, la creatività e il pensiero critico sono ritenute tre skills fondamentali per un'azienda digitale. Queste competenze sono in linea con l'idea dello sviluppo e innovazione costante. Con il passare del tempo, infatti, l'azienda avrà sempre più interesse a ricercare lavoratori con idee innovative che siano in grado di contribuire al cambiamento dell'azienda stessa, mentre dall'altro lato però, tutto ciò comporterà una riduzione delle richieste di operatori prettamente esecutori. Secondo il WEF, sono emersi profili professionali specialistici completamente nuovi legati alla comprensione e allo sfruttamento delle più recenti tecnologie emergenti. Tra le professioni che stanno emergendo e che avranno un incremento nella crescita della domanda fino al 2022 vi sono in particolare i Data Analysts, Data Scientists, Sviluppatori software, Ecommerce e Social Media Specialist. Ai Data Scientists, ad esempio, verrà chiesto di analizzare la grande mole di dati che derivano dalle macchine al fine di ricavarne informazioni utili e conseguentemente elaborare soluzioni a fronte di eventuali problemi. Dinanzi a questo cambiamento aziendale causato dall'automatizzazione e dall'interconnessione lungo tutto il processo, si prevede una crescita di ruoli che fanno leva su competenze umane distintive, in ambiti come il servizio ai clienti, le vendite e il marketing, la formazione e lo sviluppo, le persone e la cultura, lo sviluppo organizzativo e l'innovazione. Da queste analisi emerge come il ruolo del capitale umano nella fabbrica e dello sviluppo delle skills necessarie a governare il processo di trasformazione è fondamentale per il progredire di un'azienda.

6.3.3 La risposta delle aziende: politiche di selezione e formazione del personale

Le attività dei lavoratori si sono evolute negli anni grazie all'introduzione di nuove tecnologie nei processi produttivi aziendali, che hanno reso i flussi di lavoro più autonomi e interconnessi. L'adozione di queste tecnologie ha ridisegnato l'organizzazione interna, rendendo necessario un esame approfondito delle attività svolte dai dipendenti. Dunque, la digitalizzazione come sappiamo ha provocato un cambiamento nei settori più coinvolti, dove alcuni ruoli sono stati sostituiti da nuovi e le competenze richieste per svolgerli sono mutate di conseguenza. È utile a questo punto interrogarsi su come questa trasformazione digitale influenzi le risorse umane all'interno dell'impresa. In particolare, durante il processo di digitalizzazione, i compiti assegnati si modificano, così come le abilità necessarie per eseguirli; un esempio evidente è l'introduzione di macchinari gestiti tramite schermi touch invece che con pulsanti e leve.

Di fronte a queste trasformazioni, diventa fondamentale adottare un approccio strutturato per identificare le competenze necessarie, articolato secondo uno studio di Seghezzi (2017)[112] in tre fasi principali (un riassunto delle competenze più richieste viene riportato qui sotto in figura 6.2):

1) Mappatura delle competenze esistenti: in questa fase iniziale, si identificano all'interno dell'organizzazione le risorse già dotate delle abilità necessarie per i nuovi ruoli derivanti dalla digitalizzazione, evitando così costosi processi di riqualificazione e risparmiando tempo ed energie.

2) Identificazione delle competenze richieste dai nuovi processi: questa seconda fase confronta le competenze attualmente disponibili con quelle necessarie per l'implementazione dei nuovi sistemi. Questo avviene attraverso una stretta collaborazione con il fornitore della tecnologia, che ne conosce il funzionamento, e con i responsabili aziendali della Ricerca e Sviluppo, capaci di valutare l'impatto complessivo sul processo produttivo.

3) Individuazione del gap di competenze: l'ultima fase è una sintesi delle precedenti e serve a identificare con precisione le competenze di cui l'azienda ha realmente bisogno per affrontare con successo la digitalizzazione.

Fig. 6.2: *Una panoramica delle professioni richieste nel 2022.*
Fonte: World Economic Forum, 2018.

[112] Seghezzi F., 2017, Lavoro e competenze nel paradigma di Industria 4.0: inquadramento teorico e prime risultanze empiriche*, Bollettino Adapt,* vol. 1, n. 5, pp. 15-34.

Quando vengono individuate le competenze mancanti, il divario può essere colmato attraverso l'assunzione di figure professionali esterne o con la riqualificazione delle risorse umane interne, mentre per quanto riguarda la formazione interna, è essenziale invece che i dipendenti comprendano come l'innovazione sia in costante crescita e che, per mantenersi competitivi, è cruciale un continuo aggiornamento. I lavoratori devono essere consapevoli dell'importanza centrale della formazione e sviluppare una mentalità aperta e pronta ad accogliere nuove idee e pratiche, evitando di rimanere legati a vecchi ruoli e abitudini operative.

Questo approccio rappresenta il fondamento del cosiddetto "Change Management", su cui si basa la formazione continua, e tale percorso formativo secondo Bersin et al. (2018)[113] si articola in quattro fasi principali:

1) Analisi dei fabbisogni: il manager deve innanzitutto identificare con precisione quali competenze e funzioni sono necessarie all'azienda.

2) Progettazione del percorso formativo: in questa fase si definiscono i destinatari della formazione e le competenze da sviluppare.

3) Attuazione del piano formativo: qui si decide la modalità di apprendimento, che può variare tra:

- *Learning by absorbing*: il soggetto apprende passivamente dalle spiegazioni di un altro, come in una lezione frontale.
- *Learning by doing*: l'apprendimento avviene attraverso lo svolgimento di attività pratiche.
- *Learning by interacting with others*: le competenze si acquisiscono tramite l'interazione e il confronto con altri individui.
- *Valutazione della formazione*: questa fase varia a seconda della prospettiva adottata, per misurare l'efficacia del percorso formativo.

Per quanto riguarda il processo di selezione e reclutamento di personale esterno, anch'esso si sviluppa in quattro fasi, sempre come riporta lo studio di Bersin et al. (2018):

1) Definizione del profilo ricercato: questa fase si svolge internamente, senza coinvolgere il mercato del lavoro. È cruciale delineare chiaramente il profilo ricercato, per evitare il rischio di assumere personale non adatta

2) Reclutamento: questa fase attiva il contatto con il mercato esterno, utilizzando diversi strumenti per attrarre i candidati.

3) Selezione: qui avviene il confronto tra i candidati, scegliendo quelli che risultano più idonei.

4) Inserimento in azienda: si formalizza l'assunzione attraverso la firma di un contratto tra datore di lavoro e dipendente.

[113] Bersin J., 2018, The Continuous Learning Framework, *Deloitte Insights*.

6.4 Il Product Lifecycle nell'epoca 4.0

Analizzando i vari aspetti organizzativi delle imprese che subiscono gli effetti scardinanti dell'Industria 4.0, è senza dubbio utile, se non fondamentale, cambiare prospettiva e osservare il tutto da un punto di vista più ampio e generale. A tale scopo prendiamo in esamina il cosiddetto ciclo di vita del prodotto (Product Lifecycle, PLC), una catena che include tutte le fasi che un prodotto attraversa dalla concezione alla dismissione, in modo da avere tramite esso una macro-visione completa dell'influenza di I4.0 sulle pratiche aziendali. L'Industria 4.0 infatti, con la sua integrazione di tecnologie avanzate sta rivoluzionando ogni fase del ciclo di vita del prodotto, dall'ideazione alla gestione del fine vita. Questo cambiamento porta con sé una maggiore efficienza, flessibilità e sostenibilità, riducendo i costi e migliorando la qualità dei prodotti (Kusiak et al., 2018)[114].

6.4.1 Sviluppo del prodotto: dalla personalizzazione alla prototipazione rapida

Nell'ambito dell'Industria 4.0, la fase di sviluppo del prodotto ha subito un'evoluzione profonda. Come riportano Tao et al. (2019)[115], tecnologie come la stampa 3D, la modellazione CAD avanzata e il Digital Twin consentono alle aziende di sviluppare prototipi con rapidità e precisione mai viste prima. La prototipazione rapida in particolare consente di creare versioni testabili di un prodotto in pochi giorni, anziché settimane o mesi, con un livello di dettaglio e precisione elevato. Questa capacità è particolarmente vantaggiosa per la personalizzazione di massa, realizzabile grazie alla stampa 3D, che permette alle aziende di offrire prodotti su misura per le esigenze specifiche dei clienti. In passato, la produzione personalizzata era complessa e costosa, richiedendo lotti limitati o lunghi tempi di progettazione, ma oggi, grazie alla modellazione digitale e alla flessibilità dei macchinari interconnessi, le aziende possono adattare i loro prodotti in tempo reale alle richieste dei consumatori, mantenendo elevati standard di efficienza e riducendo drasticamente i tempi di consegna.

La personalizzazione inoltre non riguarda solo l'estetica o le dimensioni, ma si estende anche alle funzionalità e alle specifiche tecniche del prodotto: è proprio in questo modo che tale fenomeno non solo riduce il time-to-market, ma favorisce anche una maggiore innovazione. Le aziende possono testare più varianti del prodotto, raccogliere feedback e apportare modifiche in corso d'opera, migliorando sia il design che le prestazioni (Kusiak et al., 2018).

6.4.2 Produzione intelligente e manutenzione predittiva

La produzione è una delle aree più influenzate dall'Industria 4.0 grazie all'introduzione delle Smart Factory, ossia fabbriche intelligenti (Kusiak et al., 2018). Le fabbriche intelligenti si basano principalmente sull'IoT, con macchinari e sensori che comunicano tra loro e raccolgono dati in tempo reale sullo stato delle operazioni.

---

[114] Kusiak Andrew, 2018, Smart Manufacturing*, International Journal of Production Research*, vol. 56, n. 1-2, pp. 508-517.

[115] Tao F. and Qi Q., 2019, Digital Twin and Big Data towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison*, Engineering*, vol. 6, pp. 3585–3593.

Uno dei principali vantaggi di questa interconnessione come avevamo già discusso addietro consiste nella manutenzione predittiva. Tradizionalmente, la manutenzione delle attrezzature avveniva in modo reattivo, cioè solo quando si verificava un guasto, o in modo preventivo, attraverso interventi pianificati a intervalli regolari (Gilchrist et al., 2016)[116]. Con l'Industria 4.0, i sensori IoT monitorano costantemente le condizioni dei macchinari, rilevando segnali di possibili anomalie o guasti imminenti. Questo permette di intervenire prima che il problema si manifesti, riducendo così i tempi di inattività e i costi di riparazione. Inoltre, non dimentichiamo che la manutenzione predittiva non solo ottimizza l'efficienza operativa, ma contribuisce anche a prolungare la vita utile dei macchinari. Le aziende, in questo modo, possono ridurre drasticamente le interruzioni della produzione e migliorare la gestione delle risorse, permettendo di massimizzare l'utilizzo di ogni componente. In più, la possibilità di raccogliere e analizzare grandi quantità di dati migliora il processo decisionale, consentendo alle imprese di adottare misure preventive basate su previsioni affidabili. In questo contesto, la produzione intelligente implica anche una gestione più efficiente dei materiali, dell'energia e delle risorse umane. Uno studio del McKinsey Global Institute del 2017[117] spiega come algoritmi di IA e machine learning ottimizzano i processi produttivi, riducendo gli sprechi e migliorando la qualità complessiva del prodotto finale.

6.4.3 Sostenibilità e gestione del fine vita del prodotto

Uno degli aspetti più rilevanti dell'Industria 4.0 è il suo impatto sulla sostenibilità e sulla gestione del fine vita dei prodotti. Grazie all'integrazione delle tecnologie digitali, le aziende possono tracciare e monitorare il ciclo di vita completo di un prodotto, dalla produzione alla dismissione. Frank et al. (2019)[118] spiegano come questo abbia enormi implicazioni per la gestione dei rifiuti e per l'adozione di modelli di economia circolare. Lo studio mostra che, tramite l'uso di strumenti come la blockchain e sistemi avanzati di data analytics, le imprese possono tracciare l'origine e il destino dei materiali impiegati in ogni fase del ciclo produttivo, e questo facilita enormemente il recupero e il riciclo delle risorse, riducendo l'impatto ambientale dei processi industriali. La stampa 3D e altre tecnologie di produzione additiva, per esempio, consentono una produzione che impiega meno risorse rispetto ai metodi tradizionali e genera minori scarti. Inoltre, le fabbriche intelligenti ottimizzano i consumi energetici attraverso la gestione automatizzata degli impianti e l'adozione di fonti rinnovabili, come il fotovoltaico o l'eolico. In aggiunta, come già precedentemente discusso anche il concetto di circular economy viene supportato dall'Industria 4.0, poiché la digitalizzazione permette di integrare processi di riutilizzo dei materiali, riciclo e rigenerazione del prodotto in un unico grande sistema di gestione supportato dalle tecnologie più avanzate. Le aziende possono così estendere il ciclo di vita di un bene, diminuendo la quantità di rifiuti prodotti e promuovendo l'adozione di modelli più sostenibili.

[116] Gilchrist A., 2016, Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*, Apress*, pp. 1-250.

[117] Mckinsey Global Institute, 2017. *Artificial Intelligence the next Digital Frontier?.* McKinsey & Company.

[118] Frank A.G., Lucas Santos Dalenogare L.S. and Ayala N.F., 2019, Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies, *International Journal of Production Economics*, vol. 210, pp. 15-26.

6.4.4 Il modello del PLC sul mercato e il ruolo dell'Intelligenza Artificiale

L'immagine proposta di seguito[119], (figura 6.3) rappresenta una curva del Product Lifecycle, che descrive le diverse fasi che un prodotto attraversa sul mercato. Questo modello è utile per comprendere come si evolvono le vendite e i profitti di un prodotto nel tempo, e per adattare le strategie di marketing, produzione e gestione in ogni fase. Le fasi principali evidenziate sono quattro: Introduzione, Sviluppo, Maturità e Declino. C'è anche una possibile fase aggiuntiva di Rivitalizzazione, che rappresenta un tentativo di rilanciare il prodotto.

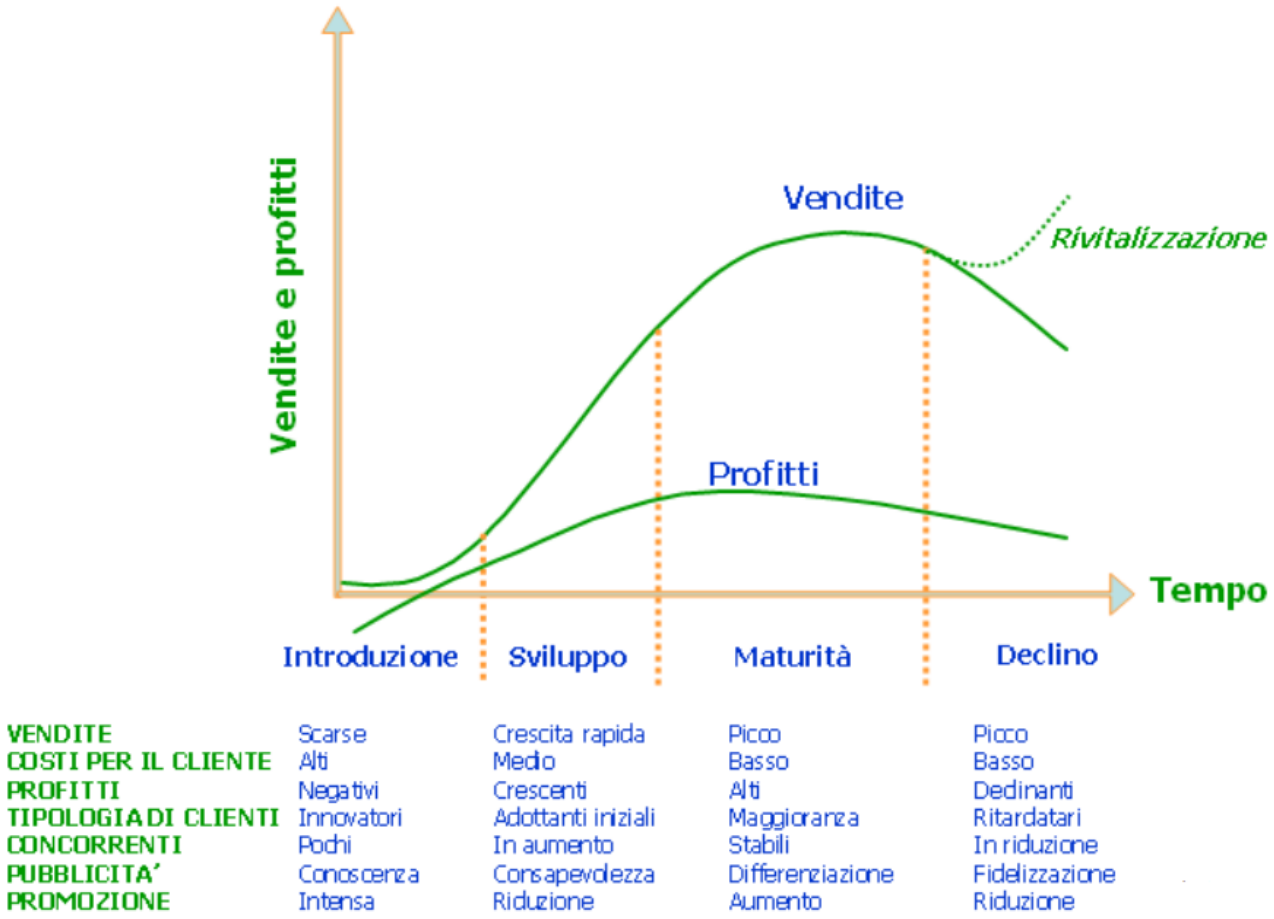

Fig. 6.3: *La curva del ciclo di vita del prodotto.*
Fonte: Marrone D., 2015.

Nella prima fase, ovvero quella di introduzione, l'azienda investe significativamente nel lancio del prodotto, concentrando in particolare gli sforzi sulla creazione di visibilità e interesse attorno al prodotto, nonostante le vendite siano ancora limitate. Il tempo necessario per superare questa fase dipende dall'accettazione del prodotto sul mercato e dalle campagne promozionali. Durante poi la fase di sviluppo, il prodotto guadagna popolarità, e l'azienda inizia a vedere un ritorno sugli investimenti.

[119] https://slideplayer.it/slide/10165919

Tuttavia, è anche una fase critica per stabilizzare il prodotto sul mercato e fronteggiare la concorrenza emergente. Passando successivamente alla fase di maturità, qui l'azienda gode di profitti elevati e stabilità. Tuttavia, il mercato è saturo, e la crescita delle vendite normalmente subisce un rallentamento. Per rimanere competitiva, l'impresa deve adottare strategie di differenziazione, innovazione incrementale e miglioramento della qualità del servizio. Quella che conclude generalmente il ciclo è infine la fase di declino, la quale segna il momento in cui l'azienda deve decidere se ritirare il prodotto dal mercato, ridurre gli investimenti o tentare una rivitalizzazione, che costituisce un'eventuale fase ulteriore che non è sempre presente per l'appunto, anche se tuttavia alcune aziende possono tentare di rilanciare un prodotto in declino. Nello specifico, la rivitalizzazione può avvenire attraverso l'innovazione, ovvero aggiungendo nuove funzionalità al prodotto per renderlo di nuovo attraente, oppure tramite nuovi mercati, e dunque espandendosi in nuove aree geografiche o mercati di nicchia. Una terza opzione è costituita poi dal cosiddetto "Rebranding", che consiste nell'apportare un cambiamento all'immagine del prodotto per attrarre nuovi segmenti di clientela. La curva del ciclo di vita del prodotto, dunque, è uno strumento utile per pianificare strategie aziendali, infatti conoscere la fase in cui si trova il prodotto permette di prendere decisioni su marketing, prezzi, innovazione e investimenti. Ogni fase richiede un approccio differente per massimizzare i profitti e prolungare la vita utile del prodotto. In virtù di questo, molte aziende hanno cominciato negli ultimi anni ad utilizzare nuovi strumenti e tecnologie con lo scopo di non entrare nella fase discendente, e ciò ha permesso loro di ritrovarsi in una nuova fase di sviluppo, crescendo continuamente. Riportiamo ancora l'articolo dell'OECD Publishing (2017), che sottolinea come ciascuna organizzazione è caratterizzata da un core business che contribuisce per la maggior parte alla generazione del profitto. Prima che esso raggiunga il punto massimo nella curva della maturità e smetta di garantire all'azienda il proprio vantaggio competitivo, è necessario rinnovare il modello di business, ed è proprio a tale proposito che l'introduzione di una nuova tecnologica, ossia l'IA, è ciò che permette a un nuovo business di inserirsi nella catena del valore. L'Intelligenza Artificiale, infatti, secondo lo studio di McKinsey Global Institute (2017) incentrato sull'IA citato in precedenza, si pone come protagonista nell'asservire a tale scopo, poiché contribuisce al miglioramento della produttività e profittabilità delle aziende del settore industriale. Come continua lo studio, il maggior beneficio in termini di valore aggiunto scaturisce dalla possibilità di delegare a sistemi intelligenti quelle attività a basso valore, permettendo all'uomo di concentrarsi ed essere maggiormente produttivo nell'attività di valore più alto: le attività "core". Le imprese dovranno definire un piano di trasformazione del proprio modello di business per cogliere queste opportunità e investire in alcune aree strategiche, quali:

- *Dati e capacità computazionale*: dal momento che occorre elaborare ed analizzare le informazioni che si hanno a disposizione;

- *Modello operativo*: bisogna anche ridefinire i propri modelli operativi sia in un'ottica di processi interni sia in termini di relazioni con gli attorni esterni, quali per esempio i fornitori, clienti, partner e centri di ricerca;

- *Competenze*: sarà necessario investire in nuove competenze in modo da utilizzare correttamente i sistemi dell'IA per sfruttarne al massimo il potenziale. Conseguentemente sarà necessario creare un nuovo modello organizzativo, definendo nuovi ruoli aziendali e assegnando al personale più talentuose attività con maggior valore aggiunto.

6.4.5 Incidenza dell'intelligenza artificiale sull'economia

Per la competitività delle aziende, come abbiamo già accennato, è diventato essenziale l'impiego dell'Intelligenza Artificiale. Il mondo dell'IA comprende tutte le applicazioni derivanti dall'uso di algoritmi matematici avanzati e sempre più accurati su grandi volumi di dati, con l'obiettivo di prendere decisioni e svolgere compiti complessi con un intervento umano minimo. Le applicazioni dell'intelligenza artificiale sono già numerose e coprono una vasta gamma di tecnologie: dalle semplici tecniche di automazione di attività elementari, ai robot che svolgono lavori ripetitivi con crescente precisione, fino alle linee di produzione che si auto-riparano istantaneamente nel settore manifatturiero, e all'utilizzo di modelli statistici complessi su grandi basi di dati. Prendiamo in esame un altro studio condotto dal McKinsey Global Institute nel 2018[120], che discute sull'impatto dell'intelligenza artificiale sull'economia mondiale; esso ha stimato che l'IA potrebbe generare un impatto economico globale di 13.000 miliardi di dollari entro il 2030, con una crescita media annua dell'1,2% del Prodotto Interno Lordo (PIL) mondiale durante questo periodo. Si tratta di una spinta economica cruciale, guidata attualmente dalle grandi potenze come Stati Uniti e Cina, mentre l'Europa, compresa l'Italia, appare in ritardo nell'adozione di queste tecnologie, ampliando così il divario già esistente in ambito digitale. Per quanto riguarda l'Europa, l'intelligenza artificiale potrebbe contribuire a una crescita del PIL di circa 2.700 miliardi di dollari (+19%) entro il 2030, con effetti positivi anche sull'occupazione. Nonostante un rallentamento iniziale nell'adozione di queste tecnologie da parte delle imprese europee, negli ultimi cinque anni esse hanno accelerato gli investimenti in IA, comprendendo l'importanza di queste tecnologie per uno sviluppo futuro significativo.

Gestendo in modo efficace la transizione digitale e l'integrazione dell'IA, grazie a investimenti sostanziali nello sviluppo di nuove competenze, le aziende e i governi europei potrebbero ottenere risultati positivi anche in termini occupazionali, con la creazione di nuovi lavori che compenserebbero quelli persi o trasformati. Tuttavia, per facilitare questa transizione, sarà necessario investire ingenti risorse nella formazione di nuove competenze. Difatti, un'impresa deve essere in grado di affrontare le sfide imposte dal contesto esterno e avviare un percorso di crescita strutturato secondo lo stesso studio in quattro fasi principali:

1) Definire una visione strategica che identifichi con precisione le aree a maggior impatto all'interno dell'organizzazione, dove l'intelligenza artificiale può essere applicata;

2)Potenziare l'infrastruttura tecnologica e la governance dei dati, partendo dalle aree chiave identificate e ottimizzando la gestione delle informazioni, evitando un sovraccarico di dati inutili;

3) Creare un centro di competenza aziendale focalizzato sulle tecniche, gli strumenti e le applicazioni di IA, centralizzando inizialmente le figure professionali specializzate, come data scientist e data engineer;

4) Introdurre nuovi ruoli e competenze all'interno delle unità operative per facilitare l'adozione di nuovi modelli di lavoro trasversali, beneficiando dell'innovazione.

[120] Bughin J., Seong J., Manyika J., Chui M. and Joshi R., 2018. Notes from the ai frontier modeling the impact of ai on the world economy*, Mckinsey Global Institute*.

La fase di transizione verso queste soluzioni rappresenta il passaggio più critico. È necessario capire come affrontarla e gestirla, soprattutto considerando che le attuali modalità di lavoro si fondano sulla collaborazione tra gruppi multidisciplinari, dove le figure aziendali operano in modo coeso e flessibile. Bisogna inoltre garantire che questo cambiamento avvenga in tutte le aree operative, investendo nelle competenze digitali avanzate e promuovendo l'innovazione, anche attraverso la creazione di nuove start-up, il che desta diversi dubbi secondo Hermann et al. (2016). Inoltre, le aziende devono considerare alcuni rischi, tra cui innanzitutto la possibile presenza di errori di programmazione, dato che i software sono creati da sviluppatori che possono commettere sbagli, pur migliorando grazie all'esperienza. In più, anche la mancanza di trasparenza nei processi decisionali degli algoritmi, che deve essere risolta per rendere verificabili le scelte del software, presenta una criticità da considerare oltre alla qualità dei dati utilizzati dai sistemi di IA, poiché è alta la probabilità che i dati siano incompleti o errati, con la complicazione aggiuntiva della gestione di eventi imprevedibili. Tutte le aziende devono comprendere l'eccezionale opportunità offerta dalla trasformazione digitale e pianificare un adeguato cambiamento dei processi organizzativi, tenendo conto degli investimenti e delle modifiche tecnologiche, gestionali e operative fondamentali, e questo aprirà a tipologie di scenari mai viste prima e che potranno ovviamente essere molto differenti tra esse (Hermann et al., 2016).

6.5 Il panorama europeo e italiano

La quarta rivoluzione industriale sta avendo un profondo impatto sulle imprese, dando progressivamente origine a modelli di business, e costringendole ad attuare strategie efficaci per garantire loro la capacità di governare in un contesto operativo in rapido mutamento. Le aziende, però, non sono gli unici attori chiamati ad implementare le opportune modifiche alla propria organizzazione; infatti, anche la rappresentanza politica è tenuta, avendone il dovere, a recepire ed apprendere questa rivoluzione al fine di attuare adeguate misure in grado di sfruttare, nella loro totalità, le utilità che la digitalizzazione comporta dal punto di vista sia sociale che economico. Lo scopo di questo paragrafo è quello di esporre ciò che è stato eseguito a livello di policy in primo luogo in Europa, per poi focalizzare l'attenzione sull'Italia, in modo da porre in evidenza come i Paesi europei hanno reagito e in che modo lo hanno fatto al fine di trarre tutti i vantaggi possibili derivanti dalla rivoluzione dell'Industria 4.0.

6.5.1 Una panoramica sulle caratteristiche delle policy europee 4.0

Nel 2017 la Commissione Europea ha sottolineato che oltre il 41% delle imprese europee non aveva ancora adottato le nuove tecnologie avanzate, nonostante dati promettenti mostrassero che il 75% dei rispondenti considerava queste tecnologie digitali come un'opportunità, e il 64% di chi vi aveva investito aveva ottenuto risultati positivi. Questa resistenza verso la digitalizzazione è spesso attribuita alla percezione che sia necessario un aggiornamento delle competenze della forza lavoro affinché l'integrazione delle tecnologie sia efficiente e produttiva. In confronto, i sistemi tradizionali non richiedono tali adeguamenti[121].

[121] http://ec.europa.eu/growth/content/digital-transformation-scoreboard-2017-0_en.

A ciò si aggiunge l'incapacità di alcuni imprenditori di utilizzare tali tecnologie, essendo abituati a prendere decisioni a breve termine. Questi elementi negativi oscurano i vantaggi reali e tangibili che la digitalizzazione potrebbe portare nelle loro aziende (OECD, 2020)[122]. Per rispondere alle nuove sfide dell'Industria 4.0, molti governi europei hanno implementato politiche specifiche mirate a promuovere l'integrazione tecnologica. Si è infatti diffuso il consenso che siano necessarie misure chiare e obiettivi concreti per stimolare le aziende a digitalizzare i processi produttivi. L'Unione Europea ha fornito linee guida generali su come gestire la transizione verso l'Industria 4.0, integrate nei programmi nazionali. L'Industria 4.0 in Europa difatti è sostenuta attualmente da una vasta gamma di programmi e iniziative, tra cui spicca l'Horizon Europe, il quale in particolare punta a promuovere l'adozione delle tecnologie avanzate in tutta l'Unione Europea[123]. Suddiviso in vari pilastri, tra cui il "Digital and Industry Cluster", l'Horizon Europe ha allocato circa 15 miliardi di euro per sostenere la ricerca e lo sviluppo di tecnologie legate all'Industria 4.0, come la produzione sostenibile e l'intelligenza artificiale. Questo programma facilita la transizione digitale delle imprese europee, migliorando la competitività industriale su scala globale. Al di là del supporto economico, Horizon Europe funge da guida per le aziende che cercano di adeguarsi ai paradigmi dell'Industria 4.0 attraverso l'adozione di tecnologie innovative come l'IoT, i sistemi cyber-fisici e i Big Data (SESEI, 2020)[124].

I piani d'azione degli Stati membri dell'UE presentano inoltre obiettivi comuni, in particolare il bisogno di uno sviluppo sostenibile e continuo, che favorisca una crescita economica compatibile con la protezione dell'ambiente e gli obiettivi sociali, potenziando la competitività delle imprese. Nonostante le differenze tra le modalità con cui i vari paesi perseguono questi obiettivi, alcuni esempi includono la Germania, che si concentra sulla manifattura per competere con i paesi a basso costo, e la Spagna, che offre prestiti alle aziende, coprendo dal 25% al 70% dei costi per gli interventi tecnologici pianificati. Come riporta infatti il Ministero Federale dell'Economia e dell'Energia (Germania, Industrie 4.0 – Smart Manufacturing in Germany, 2020)[125], la Germania in particolare tra i paesi ha assunto una posizione di leadership con il suo progetto Industrie 4.0, che è considerato una delle iniziative nazionali più complete nel campo della digitalizzazione industriale. Nello specifico, Industrie 4.0 si concentra sull'integrazione delle tecnologie digitali nelle piccole e medie imprese (PMI), che rappresentano la spina dorsale dell'economia tedesca. L'iniziativa punta a modernizzare la produzione manifatturiera attraverso una serie di tecnologie avanzate, come i sistemi cyber-fisici e l'IoT, promuovendo la transizione verso la "fabbrica intelligente". Anche se la Germania ha fatto grandi progressi, l'adozione di tecnologie Industria 4.0 non è uniforme in tutta l'Europa, dal momento che sono presenti diverse sfide e disparità regionali in tutto il continente europeo che costituiscono alcuni dei principali ostacoli all'implementazione delle tecnologie legate all'Industria 4.0.

[122] OECD, 2020, *Digital Economy Outlook, 2021*. *SpringerLink, Industry 4.0: A European Perspective.* OECD Publishing.

[123] Commissione Europea, 2021, *Horizon Europe*.

[124] SESEI, 2020, *Industrie 4.0: National Programs for Digital Transformation.*

[125] https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Home/home.html

La disomogeneità delle infrastrutture digitali e la carenza di competenze sono problemi rilevanti in molte regioni, in particolare in quelle rurali o meno sviluppate economicamente. Questo si traduce in una scarsa adozione delle tecnologie avanzate, in particolare da parte delle PMI, che spesso non dispongono delle reti di comunicazione necessarie, come la banda larga, per implementare tecnologie come l'IoT. Inoltre, la formazione di una forza lavoro qualificata in queste aree è un'altra sfida significativa, come ben sappiamo (Commissione Europea, 2021)[126]. Nonostante queste difficoltà, diversi Stati membri dell'Unione Europea hanno messo in atto iniziative per promuovere la digitalizzazione. Ad esempio, la Germania, con Plattform Industrie 4.0, è tra i Paesi che hanno guidato questo processo. Anche i Paesi Bassi, con il programma Smart Industry, e la Spagna, con Industria Conectada 4.0, stanno facendo progressi significativi in questo ambito, ed in più questi programmi nazionali sono spesso accompagnati da collaborazioni pubblico-private per favorire l'innovazione e sostenere lo sviluppo tecnologico. Tuttavia, non tutti i Paesi adottano lo stesso approccio. Alcuni, come la Spagna e la Francia, hanno optato per modelli di sostegno finanziario basati su prestiti e incentivi fiscali, a seconda delle necessità aziendali. La Francia, in particolare, combina prestiti, incentivi fiscali e investimenti privati in Ricerca e Sviluppo (R&S). La Svezia, invece, si distingue per un modello in cui l'industria ha un ruolo primario, ed è principalmente guidata dal settore privato; mentre il Regno Unito ha sviluppato sette centri tecnologici per fornire alle imprese accesso a tecnologie avanzate e competenze specialistiche, anche per mitigare i rischi legati all'innovazione. Questo approccio decentralizzato, spesso definito bottom-up, è in netto contrasto con il modello top-down adottato da altre nazioni europee, dove i governi definiscono a livello centrale obiettivi chiari per l'innovazione tecnologica, come riportato dallo studio dell'OECD SpringerLink (2020). In questo contesto di innovazione tecnologica continua, l'Italia si distingue non solo per la sua attenzione alla R&S, ma anche per l'impegno nel sostenere l'innovazione in tutti i settori industriali. Tuttavia, diversi paesi pongono l'accento su specifici aspetti della digitalizzazione: Germania e Francia si concentrano su tecnologie come l'Internet of Things e i Cyber-Physical Systems, mentre Italia e Svezia privilegiano la sostenibilità produttiva. La Spagna punta a migliorare lo scambio di informazioni tra le imprese, incoraggiando l'adozione del nuovo paradigma tecnologico, mentre l'Olanda si focalizza sulla riduzione dei costi e l'adattamento alle esigenze di mercato. Per rendere operative queste politiche, i paesi europei utilizzano principalmente finanziamenti pubblici, con il contributo di sussidi privati. Questi finanziamenti, come riporta la Commissione Europea (2021), sono affiancati da misure concrete di attuazione, adottando spesso proprio l'approccio "top-down", in cui gli obiettivi principali vengono definiti a livello centrale e poi dettagliati dai vari stakeholder. Al contrario, Svezia e Olanda hanno adottato come il Regno Unito un approccio "bottom-up", basato sull'interazione tra università, ricerca e governo, noto come modello della "tripla elica", per stabilire priorità e politiche di innovazione. Un altro esempio di diversità nelle politiche nazionali è dato dall'Italia, che, pur condividendo con altri Paesi europei l'enfasi sulla digitalizzazione, ha posto un forte accento sulla ricerca e sviluppo (R&S), nonché sulla sostenibilità della produttività. La strategia italiana si concentra su un ampio spettro di settori industriali senza favorirne uno in particolare, sebbene, come in Germania e Francia, ci siano piani specifici per sviluppare tecnologie innovative come l'IoT e i Cyber-Physical Systems.

[126] Commissione Europea, 2021, *Digital Transformation Scoreboard.*

Anche l'Olanda è un esempio di differenziazione, poiché pone l'accento sulla riduzione dei costi per l'adeguamento tecnologico, incoraggiando le aziende a rispondere alle mutevoli esigenze di mercato.

In conclusione, sicuramente l'adozione delle tecnologie digitali nel contesto dell'Industria 4.0 in Europa è un fenomeno complesso e variegato, sostenuto da una combinazione di finanziamenti pubblici e privati, nonché da misure specifiche che mirano a facilitare la transizione tecnologica. In questo senso, tutta l'Europa si sta muovendo verso tale digitalizzazione diffusa dell'industria, con strategie nazionali che, pur differenziandosi nelle modalità di attuazione (si veda la tabella 6.1 qui sotto a tal proposito), condividono la necessità di sostenere e incentivare l'innovazione tecnologica in tutti i settori industriali.

Tabella 6.1: *Fattori chiave delle iniziative politiche nazionali di Industria 4.0 in Europa introdotte dal 2017.*

Paese	Obiettivo principale	Aree tecnologiche/strategiche
Francia	Diffusione del paradigma	Trasporti, IoT, AI, Big Data, High Performance Computing, Cybersecurity, Salute pubblica, Smart Cities
Germania	Diffusione del paradigma	Sistemi Cyber-fisici, IoT
Italia	Ricerca e Sviluppo	Generico
Olanda	Diffusione del paradigma	Generico
Spagna	Misto	Piattaforme digitali, Big Data, Applicazioni collaborative
Svezia	Diffusione del paradigma	Generico
Regno Unito	Diffusione del paradigma	Aerospaziale, Automotive, Chimica, Nucleare, Farmaceutico, Elettronica
Repubblica Ceca	Diffusione del paradigma	Generico

6.5.2 Il caso italiano: Il Piano Nazionale Industria 4.0

Dopo una panoramica sul contesto europeo, è utile esaminare come l'Italia abbia attuato gli obiettivi fissati per favorire la digitalizzazione e le misure adottate dal governo. L'economia italiana ha subito fortemente le conseguenze della crisi finanziaria del 2008, soprattutto nel settore manifatturiero, che in passato era stato un pilastro del Paese. La crisi ha infatti compromesso la competitività e la capacità produttiva di molte imprese, rendendo la trasformazione digitale una necessità per rilanciare le aziende e restituire slancio all'economia nazionale (PwC Italia, 2021)[127]. Per rispondere a queste sfide, nel settembre 2016, l'allora Presidente del Consiglio Matteo Renzi e il Ministro dello Sviluppo Economico Carlo Calenda hanno introdotto il "Piano Nazionale Industria 4.0" (ora evoluto nel Piano Transizione 4.0 con l'aggiornamento avvenuto nel 2020).

[127] PwC Italia, 2021, *Digital Transformation in Italy: Industry 4.0 and its effects.*

Come spiega un report di Unioncamere & Ministero dello Sviluppo Economico (MISE, 2020)[128], il piano si proponeva di affrontare alcune delle sfide che frenavano l'industria italiana, in particolare la scarsa competitività a livello internazionale, la lenta adozione di tecnologie innovative, e la necessità di aggiornare le competenze della forza lavoro, attraverso la promozione dell'adozione di tecnologie avanzate, con l'obiettivo di migliorare la produttività e accelerare l'introduzione dei prodotti sul mercato, favorendo una maggiore competitività sia sul piano interno che globale. Uno degli strumenti principali di supporto era inoltre il credito d'imposta, un meccanismo di agevolazione fiscale per le imprese che investivano in macchinari e software tecnologicamente avanzati. Il piano puntava anche a migliorare la formazione della forza lavoro attraverso iniziative di formazione 4.0 per sviluppare competenze adeguate alla trasformazione digitale in corso. Secondo i dati pubblicati, oltre 4 miliardi di euro sono stati stanziati per sostenere gli investimenti tecnologici delle imprese italiane nei primi anni del piano. In aggiunta, è stato previsto un ampliamento delle misure per promuovere l'internazionalizzazione e lo sviluppo di nuove competenze attraverso la formazione continua. Il Piano Industria 4.0 rappresenta tuttora una svolta cruciale nella politica economica del Paese, segnando il tentativo più strutturato di promuovere l'innovazione tecnologica nelle imprese italiane, basandosi su due direttrici fondamentali (riportate e schematizzte i figura 6.5)[129]:

1)*Investimenti innovativi*: l'introduzione di incentivi fiscali, come il superammortamento per l'acquisto di macchinari e l'iperammortamento per l'acquisto di beni strumentali digitali, ha stimolato gli investimenti delle imprese in tecnologie avanzate. Si è puntato, inoltre, ad aumentare la spesa in ricerca e sviluppo, con agevolazioni fiscali dedicate. La finanza d'impresa ha giocato un ruolo chiave, fornendo un supporto finanziario diretto per consentire alle aziende di realizzare investimenti in chiave Industria 4.0.

2)*Competenze e formazione*: la digitalizzazione non è solo una questione tecnologica, ma implica anche una trasformazione culturale. Il Piano prevede un rafforzamento delle competenze attraverso iniziative di formazione rivolte ai lavoratori e alle nuove generazioni, con la creazione di percorsi formativi specifici nelle scuole e nelle università, l'istituzione di centri di competenza e di hub di innovazione digitale. Questi ultimi rappresentano poli di ricerca e sviluppo, dove le imprese possono confrontarsi con il mondo accademico per elaborare soluzioni innovative (MISE, 2020).

Nonostante il successo iniziale del Piano descritto da Centro Studi Confindustria (2021)[130], che nel 2017 ha portato a un incremento del 9% degli investimenti privati, con un aumento dell'11,5% nel settore dei macchinari, e a un miglior accesso ai fondi di garanzia per le PMI, la digitalizzazione in Italia resta comunque disomogenea. Le grandi imprese hanno certo adottato con più rapidità le tecnologie digitali, ma le PMI, che costituiscono l'ossatura del tessuto economico nazionale, incontrano ancora diverse difficoltà.

[128] Unioncamere & Ministero dello Sviluppo Economico (MISE), 2020, *Industria 4.0: Piano Nazionale Impresa 4.0 - Analisi e prospettive*.

[129] Agenzia delle entrate, Ministero dello Sviluppo Economico, *Industria 4.0 - Articolo 1, commi da 8 a 13, della legge 11 dicembre 2016, n. 232 - Proroga, con modificazioni, della disciplina del c.d. "super ammortamento" e introduzione del c.d. "iper ammortamento",* circolare N.4/E del 30/03/2017.

[130] Centro Studi Confindustria, 2021, *Transizione digitale delle PMI italiane: sfide e opportunità.*

La mancanza di risorse finanziarie, competenze specifiche e la difficoltà di accesso al credito costituiscono ostacoli significativi, soprattutto per le aziende che operano nei settori meno tecnologicamente avanzati. Il panorama industriale italiano è infatti caratterizzato dalla prevalenza di PMI, che spesso faticano ad affrontare i costi e le complessità legate alla trasformazione digitale. Le imprese più piccole, soprattutto nel Sud del Paese, soffrono la mancanza di infrastrutture digitali adeguate e di competenze necessarie per implementare soluzioni innovative, rischiando di rimanere escluse dal progresso tecnologico. Dunque, anche se il Piano ha in ogni caso dato frutti positivi già nel primo anno, con un aumento significativo della spesa in ricerca e sviluppo (tra il 10% e il 15%) e una maggiore fiducia da parte degli imprenditori, è evidente che tuttavia l'Italia dovrà continuare a implementare riforme e strategie a lungo termine per garantire che la trasformazione digitale sia accessibile a tutte le aziende, indipendentemente dalle dimensioni o dal settore, nonostante tutti gli incentivi presenti oltre al Piano. Le stime per il futuro sono incoraggianti, ma il Paese dovrà continuare a investire in infrastrutture digitali, a promuovere la formazione di nuove competenze e a sostenere le PMI affinché possano partecipare a pieno titolo alla quarta rivoluzione industriale. Continuare su questa strada sarà quindi essenziale per mantenere la competitività del Paese a livello internazionale, in un contesto sempre più caratterizzato dall'innovazione tecnologica e dalla digitalizzazione dei processi produttivi (PwC Italia, 2021).

Fig. 6.5: *Direttrici strategiche di intervento del Piano Industria 4.0.*
Fonte: Ministero dello Sviluppo Economico, 2017.

Al netto di tutto, malgrado le sfide e le difficoltà, alcuni settori industriali in Italia, come la manifattura e l'automotive, hanno dimostrato un grande dinamismo nell'adozione delle tecnologie 4.0. In particolare, il MISE riporta come nel settore manifatturiero, le tecnologie come la stampa 3D, i robot collaborativi e i sistemi di controllo di processo siano diventati sempre più comuni, rendendo l'industria italiana più competitiva a livello globale.

Dunque, l'uso di robotica avanzata, sensoristica IoT e intelligenza artificiale ha migliorato significativamente l'efficienza produttiva e la gestione della catena di approvvigionamento. Dall'altra parte, nel settore automotive, l'adozione di tecnologie di automazione avanzata e l'uso di intelligenza artificiale per la gestione della produzione e della manutenzione predittiva hanno permesso alle aziende di competere con i principali attori globali. Il settore ha anche visto investimenti significativi in veicoli elettrici e nello sviluppo di soluzioni per la mobilità sostenibile, ambiti cruciali per il futuro dell'industria automobilistica europea.

Come abbiamo discusso, il futuro dell'industria italiana nel contesto di Industria 4.0 dipenderà dalla capacità del Paese di continuare a sostenere l'adozione di tecnologie avanzate, in particolare tra le PMI. Sempre il MISE pone un forte accento sulla collaborazione pubblico-privato, sul miglioramento delle infrastrutture digitali, e vero una maggiore attenzione alla formazione delle competenze digitali, i quali saranno essenziali per colmare il divario esistente tra le grandi imprese e le PMI.

Tabella 6.2: *Tabella riassuntiva degli aspetti positivi e negativi derivanti dagli impatti organizzativi di I4.0.*

Aspetti	Pro	Contro
Supply Chain	- Miglioramento della visibilità e della tracciabilità grazie a tecnologie avanzate (IoT, blockchain) - Riduzione dei costi operativi e maggiore efficienza - Miglioramento della qualità e trasparenza delle operazioni	- Alti costi di implementazione per tecnologie come ERP e blockchain - Vulnerabilità agli attacchi informatici e ai guasti tecnici - Difficoltà di accesso per le PMI, spesso limitate dalle risorse disponibili
Trasformazione del Lavoro e del Lavoratore	- Aumento delle competenze e maggiore flessibilità - Riduzione dei compiti ripetitivi e maggiore responsabilità - Opportunità di formazione e riqualificazione (es. formazione 4.0)	- Rischio di resistenza da parte dei lavoratori per timore di perdita del posto di lavoro - Alienazione e aumento dello stress dovuti a un ambiente lavorativo iperconnesso - Complessità nella gestione delle competenze necessarie
Product Lifecycle	- Riduzione del time-to-market grazie a tecnologie come la stampa 3D - Efficienza migliorata nella gestione del ciclo di vita - Sostenibilità e riduzione degli sprechi con modelli di economia circolare	- Aumento della produzione di dispositivi tecnologici, con potenziale impatto ambientale - Costi elevati per adattarsi a standard di sostenibilità e per l'integrazione di nuove tecnologie
Politiche Europee e Italiane	- Incentivi fiscali e programmi di supporto (super e iper-ammortamento) - Sostegno alla digitalizzazione delle PMI attraverso finanziamenti e programmi nazionali (es. Horizon Europe, Piano Nazionale Industria 4.0)	- Disomogeneità nell'adozione delle tecnologie tra grandi aziende e PMI - Gap nelle infrastrutture digitali in diverse regioni, in particolare quelle rurali o meno sviluppate - Complessità nell'accesso ai fondi per le PMI

CONCLUSIONI

L'Industria 4.0 rappresenta una tappa cruciale nell'evoluzione del settore industriale, promettendo di rivoluzionare la produzione e la gestione aziendale attraverso l'integrazione di tecnologie digitali avanzate. Questa trasformazione non solo migliora l'efficienza e la produttività, ma apre anche nuove opportunità per la personalizzazione dei prodotti, la sostenibilità ambientale e lo sviluppo di competenze innovative. Tuttavia, per trarre pieno vantaggio dall'Industria 4.0, le aziende devono affrontare le sfide legate alla sicurezza informatica, alla resistenza al cambiamento e alla necessità di aggiornare continuamente le competenze dei lavoratori. Con un approccio strategico e una gestione attenta, l'Industria 4.0 può diventare un motore di crescita e competitività a lungo termine per le imprese di tutto il mondo.

Come abbiamo avuto modo di vedere, la quarta rivoluzione industriale non è solo una questione di tecnologia, ma rappresenta un cambiamento fondamentale nel modo in cui le aziende operano e creano valore, promuovendo una nuova era di innovazione e sviluppo sostenibile. Infatti, si prevede che l'Industria 4.0 possa avere ulteriori conseguenze sulla gestione e sui posti di lavoro futuri, consentendo la creazione di nuovi modelli di business, che avranno un grande effetto sull'industria e sui mercati, influenzando di fatto l'intero ciclo di vita del prodotto, fornendo un nuovo modo di produrre e fare impresa, permettendo il miglioramento dei processi e aumentando la competitività dell'azienda. L'Industria 4.0 porterà a potenziali cambiamenti profondi in diversi ambiti che vanno oltre il settore industriale. Al netto di tutto quello che abbiamo esaminato, i suoi impatti e la sua influenza possono essere classificati in sei aree principali: (1) Industria, (2) Prodotti e servizi, (3) Modelli di business e mercato, (4) Economia, (5) Ambiente di lavoro e (6) Sviluppo delle competenze.

L'industria è sicuramente il settore che subirà maggiormente gli impatti dell'Industria 4.0. Questo nuovo paradigma industriale porterà una nuova visione manifatturiera caratterizzata da una produzione decentralizzata e digitalizzata, in cui gli elementi produttivi sono in grado di controllarsi autonomamente, innescare azioni e rispondere ai cambiamenti nel loro ambiente. Inoltre, il paradigma emergente propone di integrare pienamente prodotti e processi, spostando la visione della produzione dalla produzione di massa alla personalizzazione di massa, che comporta un livello più elevato di complessità. Pertanto, i processi e le operazioni di produzione saranno profondamente influenzati dagli sviluppi tecnologici e dalla creazione di fabbriche intelligenti, consentendo una maggiore flessibilità nelle operazioni e un'allocazione più efficiente delle risorse.

In aggiunta a questo, come abbiamo discusso l'Industria 4.0 avrà un'influenza importante sui processi industriali, sui sistemi produttivi e sulle catene di fornitura, ed avvierà una trasformazione radicale dell'attuale panorama industriale attraverso la digitalizzazione della produzione, l'automazione ed il collegamento del sito produttivo in una catena di fornitura completa. Come si può intuire, il fulcro di ogni rivoluzione industriale è l'aumento della produttività. Tuttavia, la quarta rivoluzione industriale va oltre a questo, poiché, oltre ad aumentare la produttività, influenzerà appunto l'intera catena di fornitura, dallo sviluppo del prodotto e dai processi di ingegneria alla logistica in uscita, per cui sia i prodotti che i servizi sono e saranno sempre più fortemente influenzati da questo nuovo paradigma industriale. Negli ultimi anni difatti, i rapidi cambiamenti nel panorama economico e le dinamiche esigenze del mercato hanno portato ad un aumento della domanda per lo sviluppo di prodotti più complessi e più intelligenti.

I prodotti diventeranno dunque più modulari e configurabili, promuovendo la personalizzazione di massa al fine di soddisfare le specifiche esigenze dei clienti.

Oltre a questo, a seguito dell'innovazione tecnologica i modelli di business e il mercato sono cambiati rapidamente negli ultimi anni, e ciò porterà alla nascita di nuovi modi di fare business. L'emergere di nuove tecnologie dirompenti nel contesto dell'Industria 4.0 ha cambiato il modo in cui prodotti e servizi vengono venduti e forniti, influenzando le attività tradizionali e introducendo nuove opportunità e modelli di mercato. Pertanto, le catene del valore stanno diventando più reattive, poiché l'industria 4.0 promuove l'integrazione tra produttori e clienti, consentendo una più stretta interazione con i clienti e l'adattamento dei modelli di business alle esigenze del mercato. L'integrazione e la complessità dei sistemi, unite alla crescente digitalizzazione della produzione industriale, porteranno alla creazione di modelli di mercato più complessi e digitali, aumentando la competitività attraverso l'eliminazione delle barriere tra informazioni e strutture fisiche.

Abbiamo visto come anche l'ambiente di lavoro stia cambiando rapidamente a causa dei progressi tecnologici e l'Industria 4.0 sta trasformando i posti di lavoro e le competenze richieste. Il cambiamento più significativo riguarda principalmente l'interfaccia uomo-macchina, che abbraccia l'interazione tra lavoratori e una serie di nuove modalità di lavoro collaborativo, dal momento che il numero di robot e macchine intelligenti è in aumento e il mondo fisico e quello virtuale si stanno fondendo. La crescente rilevanza delle interfacce uomo-macchina promuoverà l'interazione tra gli elementi di produzione e la comunicazione richiesta tra macchine intelligenti, prodotti intelligenti e dipendenti. Per questo motivo, le questioni ergonomiche dovrebbero essere prese in considerazione nel contesto dell'industria 4.0 e i sistemi futuri dovrebbero concentrarsi sui lavoratori e sulla loro importanza, come abbiamo discusso nella sezione dedicata alle questioni sociali. L'integrazione dell'Industria 4.0 nei sistemi produttivi e la crescente implementazione di nuove tecnologie avranno un impatto sui profili lavorativi, nonché sulla gestione, organizzazione e pianificazione del lavoro. La sfida principale in questo contesto è evitare la cosiddetta disoccupazione tecnologica, ridefinendo i posti di lavoro attuali e adottando misure per adattare la forza lavoro ai nuovi posti di lavoro che verranno creati. Lo sviluppo delle competenze, che porterà a cambiamenti demografici e sociali, è uno dei fattori chiave più importanti per un'adozione e un'implementazione di successo del quadro dell'Industria 4.0. La visione futura del lavoro richiederà infatti nuove competenze ed è necessario creare opportunità per l'acquisizione delle competenze richieste attraverso una formazione di alta qualità.

Come abbiamo ribadito più volte, inoltre, questo nuovo paradigma industriale avrà un impatto enorme sul mercato del lavoro e sui ruoli professionali, poiché sarà fondamentale garantire che vengano creati più posti di lavoro rispetto a quelli che scompariranno. I nuovi campi di competenza richiesti devono essere inclusi nell'istruzione, poiché il pensiero interdisciplinare giocherà un ruolo importante e si cercheranno competenze eccellenti nei settori sociali e tecnici. L'Industria 4.0 porterà a una maggiore automazione delle attività, il che significa che i lavoratori dovrebbero essere preparati a svolgere nuovi compiti. Lo stesso vale per la formazione ingegneristica che ha un grande potenziale per formare i professionisti del futuro e renderli consapevoli delle nuove tendenze e opportunità tecnologiche, così come i manager che dovrebbero adattare la loro strategia di gestione alle nuove esigenze del mercato. Inoltre, nei settori tecnologici sarà necessario personale sempre più qualificato per far fronte alle esigenze dell'Industria 4.0.

In sintesi, l'Industria 4.0 rappresenta, nonostante le sue criticità e problematiche, un enorme potenziale in molti ambiti e la sua implementazione avrà impatti molto consistenti sull'intera catena del valore, migliorando i processi produttivi e di ingegneria, elevando la qualità di prodotti e servizi, ottimizzando il rapporto tra clienti e organizzazioni, portando nuove opportunità di business e benefici economici, modificando i requisiti educativi e trasformando l'attuale ambiente di lavoro.

BIBLIOGRAFIA

Addo-Tenkorang R. and Helo PT, 2016, Big data applications in operations/supply-chain management: A literature review, *Computers & Industrial Engineering,* vol. 101, pp. 528-543.

Agenzia delle entrate, Ministero dello Sviluppo Economico, *Industria 4.0 - Articolo 1, commi da 8 a 13, della legge 11 dicembre 2016, n. 232 - Proroga, con modificazioni, della disciplina del c.d. "super ammortamento" e introduzione del c.d. "iper ammortamento",* circolare N.4/E del 30/03/2017.

Alkaraan F., Albitar K., Hussainey K. and Venkatesh V.G., 2022, Corporate transformation toward Industry 4.0 and financial performance: The influence of environmental, social, and governance (ESG*), Technological Forecasting & Social Change*, vol. 157.

American Psychological Association (APA), 2019, *Technology and the Future of Work.*

Annanth V. K., Abinash M. and Rao L.B., 2021, Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A case study of siemens industry, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1969.

Anshuman Singh, 2024, *What is Cloud Computing Architecture? Advantages and Disadvantages.*

Avogaro M., 2019, The Highest Skilled Workers of Industry 4.0: New Forms of Work Organization for New Professions. A Comparative Study, *E-Journal of International and Comparative*, vol. 8, n. 1.

Bai C., Dallasega P., Orzes G., Sarkis J., 2020, Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective Chunguang, *International Journal of Production Economics*, vol. 229.

Ben-Daya M., Hassini E., Bahrounm Z., 2019, Internet of things and supply chain management: a literature review, *International Journal of Production Research*, vol. 57, n. 15–16, pp. 4719–4742.

Benotsmane R., Kovács G., and Dudás L., 2019, Economic, Social Impacts and Operation of Smart Factories in Industry 4.0 Focusing on Simulation and Artificial Intelligence of Collaborating Robots. *Social Sciences*, vol. 8, n. 5, 143

Bernard M., 2018, The Fourth Industrial Revolution: How the 4th Industrial Revolution Is Changing the Way We Work and Live*, Forbes*.

Bersin J., 2018, The Continuous Learning Framework, *Deloitte Insights*.

Birkel H., Müller J.M., 2021, Potentials of industry 4.0 for supply chain management within the triple bottom line of sustainability–A systematic literature review*, Journal of Cleaner Production*, vol. 289.

Birkel H.S., Veile J.W., Müller J.M., Hartmann E. and Voigt K.I., 2019, Development of a risk framework for Industry 4.0 in the context of sustainability for established manufacturers, *Sustainability*, vol. 11, n. 2.

Bohnsack R., Bidmon C.M. and Pinkse J.,2022, *Sustainability in the digital age: Intended unintended consequences of digital technologies for sustainable development*. Business Strategy and the Environment, vol. 31, pp. 599-602.

Bonilla S.H, Helton, Silva H.R.O., Terra da Silva M., Gonçalves R.F. and Sacomano J.B., 2018, Industry 4.0 and Sustainability Implications: A Scenario-Based Analysis of the Impacts and Challenges, *Sustainability*, vol. 10., n. 10.

Bosch, 2018, *Predictive Maintenance: The Future of Machinery Maintenance.*

Boston Consulting Group, 2021, *How Industry 4.0 Is Transforming Business.*

Brettel M., Friederichsen N., Keller M. and Rosenberg M., 2014, How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective*. International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*, vol. 8, n. 1.

Buchi G., Cugno M. and Castagnoli R., 2020, Smart factory performance and Industry 4.0, *Technological Forecasting & Social Change,* vol. 150.

Bughin J., Seong J., Manyika J., Chui M. and Joshi R., 2018. Notes from the ai frontier modeling the impact of ai on the world economy*, Mckinsey Global Institute*.

Chan F.L., Hon C.-Y., Tarlo S.M., Rajaram N. and House R., 2020, Emissions and health risks from the use of 3D printers in an occupational setting*, Journal of Toxicology and Environmental Health*, *Part A*, vol. 83, pp. 279-287.

Centro Studi Confindustria, 2021, *Transizione digitale delle PMI italiane: sfide e opportunità.*

Chen Y., 2017, Integrated and Intelligent Manufacturing: Perspectives and Enablers, *Engineering*, vol. 3, n. 5, pp. 588-595.

Ciliberto C., Szopik-Depczy_nska K., Tarczy_nska-Łuniewska M., Ruggieri A. and Ioppolo G., 2021, Enabling the Circular Economy transition: a sustainable lean manufacturing recipe for Industry 4.0, *Business Strategy and the Environment*, vol. 30, n. 7, pp. 3255-3272.

Cirillo V., Rinaldini M., Staccioli J. and Virgillito M.E., 2021, *Technology vs workers: the case of Italy's industry 4.0 factories*, Structural Change and Economic Dynamics, vol. 56, pp. 166-183.

Commissione Europea, 2021, *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry.*

Commissione Europea, 2021, *Digital Transformation Scoreboard.*

Commissione Europea, 2020, *A Strong Social Europe for Just Transitions.*

Consiglio C., Massa N., Sommovigo V., and Fusco L., 2023, Techno-Stress Creators, Burnout and Psychological Health among Remote Workers during the Pandemic: The Moderating Role of E-Work Self-Efficacy*, Environmental Research and Public Health*, vol. 20, n. 22.

Dalmarco G., Ramalho F.R., Barros A.C. and Soares A.L., 2019, Providing industry 4.0 technologies: the case of a production technology cluster, *The Journal of High Technology Management Research*, vol. 30, n. 2.

Deloitte, 2020, *Industry 4.0: A Global Perspective.*

Demir K. A., Döven G., and Sezen B., 2019, Industry 5.0 and Human-Robot Co-working*, Procedia Computer Science*, vol. 158, pp. 688-695.

Dieste M., Orzes G., Culot G., Sartor M. and Nassimbeni G., 2023, The "dark side" of Industry 4.0: How can technology be made more sustainable?, *International Journal of Operations& Production Management. Emerald Publishing Limited*, vol. 44., n. 5.

Emerson D.J., Hair Jr J.F.H. and Kenneth J. Smith K.J., 2023, Psychological Distress, Burnout, and Business Student Turnover: The Role of Resilience as a Coping Mechanism, *Research in Higher Education*, vol. 64, pp. 228–259.

EXPERTISE, Reference Project Engineering, tech, 2022, *Sistema di supervisione e controllo di dispositivi di termoregolazione.*

Ford S. and Despeisse M., 2016, Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, *Journal of Cleaner Production,* vol. 137, pp. 1573-1587.

Frank A.G., Lucas Santos Dalenogare L.S. and Ayala N.F., 2019, Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies, *International Journal of Production Economics*, vol. 210, pp. 15-26.

Gartner, 2022, *Top Strategic Technology Trends for 2022: Industry 4.0.*

General Electric, 2020, *Digital Thread for Aerospace.*

General Electric, 2017*, Brilliant Manufacturing from GE Digital*.

Ghobakhloo M., 2020, Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, vol. 252.

Gilchrist A., 2016, Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*, Apress*, pp. 1-250.

Govindan K., Azevedo S., Carvalho H. and Cruz-Machado V., 2015, Lean, green and resilient practices influence on supply chain performance: interpretive structural modeling approach, *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 12, n. 1, pp. 15–34.

Gregolinska E., Khanam R., Lefort F. and Prashanth Parthasarathy, 2022, Capturing the true value of Industry 4.0, *McKinsey & Company.*

Grigore G., Molesworth M., Miles C. and Glozer S., 2021, (Un) resolving digital technology paradoxes through the rhetoric of balance*, Organization,* vol. 28, n. 1, pp. 186–207.

Grybauskas A., Stefanini A., Ghobakhloo M., 2022, Social sustainability in the age of digitalization: A systematic literature Review on the social implications of industry 4.0*, Technology in Society*, vol. 70.

Harvard Business Review, 2017, *How Smart, Connected Products Are Transforming Competition.*

Henriques P., 2023, Manufacturing Execution Systems (MES) and Industry 4.0, *Onramp Solutions*.

Hermann M., Pentek T. and Otto B., 2016, Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review, *Hawaii international conference on system sciences (HICSS),* pp. 3928-3937.

Hoyer C., Gunawan I. and Reaiche C.H., Ph.D, 2020, The Implementation of Industry 4.0 – A Systematic Literature Review of the Key Factors, *Systems Research and Behavioral Science*, vol. 37, n. 4, pp. 557-578.

i-SCOOP, 2020, *What Is IOT (Internet Of Things).*

International Labour Organization (ILO), 2021, *World Employment and Social Outlook 2021: The role of digital labor platforms in transforming the world of work.*

International Telecommunication Union (ITU), 2020, *Measuring Digital Development: Facts and Figures 2020.*

ISTAT, *Il mercato del lavoro*, IV semestre 2019, Marzo 2020.

Ivanov D., Dolgui A. and Sokolov B., 2019, The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics*, International Journal of Production Research*, vol. 57, n. 3.

Iza World of Labour, 2014, *Youth labor market interventions.*

Jamwal A., Agrawal R., Sharma M. and Giallanza A., 2021, Industry 4.0 Technologies for Manufacturing Sustainability: A Systematic Review and Future Research Directions. *Applied Science*, vol. 11, n. 12.

Javaid M. and Haleem A., 2020, Critical components of Industry 5.0 towards a successful adoption in the field of manufacturing, *Journal of Industrial Integration and Management*, vol. 5, n. 3, pp. 327-348.

Kagermann H., Wahlster W. and Helbig J., 2013, Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*, Acatech - National Academy of Science and Engineering*, pp. 12-25.

Kamble S.S., Gunasekaran A. and Gawankar S.A., 2018, Sustainable industry 4.0 framework: a systematic literature review identifying the current trends and future perspectives, *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 117, pp. 408-425.

Khan R., and Kumar P., 2020, Low Power Wide Area Networks for IoT Applications: Opportunities, Challenges, and Directions. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 206714-206744.

Kılıç C. and Atilla G., 2023, Industry 4.0 and sustainable business models: An intercontinental sample, *Business Strategy and the Environment*, vol. 33, n. 4, pp. 3142-3166.

Kirvan P., Essex D. and Kakade S., 2024, Definition: transportation management system (TMS), *TechTarget*.

Kohtamäki M., Paridaa V., Patelc P.C. and Gebauerd H., 2020, The relationship between digitalization and servitization: The role of servitization in capturing the financial potential of digitalization, *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 151.

Kusiak Andrew, 2018, Smart Manufacturing*, International Journal of Production Research*, vol. 56, n. 1-2, pp. 508-517.

Li Y., Dai J., Cui L.,2020, The impact of digital technologies on economic and environmental performance in the context of industry 4.0: A moderated mediation model, *International Journal of Production Economics,* vol. 229.

Lin B., Wu1 W., Song M., 2019, Industry 4.0: driving factors and impacts on firm's performance: an empirical study on China's manufacturing industry*, Annals of Operations Research*, vol. 329, pp. 47–67.

Lopes de Sousa Jabbour A.B., Jabbour C.J.C., Godinho Filho M. and Roubaud D., 2018, Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations, *Annals of Operations Research,* vol. 270, pp. 273–286.

Lupi C., De Luca E. e Pastaro Veronica Sistemi & Impresa, 2017, *Management e tecnologie per le imprese del futuro,* ESTE cultura d'impresa, Milano.

Martinelli A., Mina A., and Moggi M., 2021, The enabling technologies of industry 4.0: examining the seeds of the fourth industrial revolution*, Industrial and Corporate Change*, vol. 30, n. 1, pp. 161–188.

McKinsey Global Institute, 2021, *The Next Normal in Manufacturing: What Industry 4.0 Means for the Future of Production,* McKinsey & Company.

McKinsey Global Institute, 2020, *The Industry 4.0 Dilemma,* McKinsey & Company.

McKinsey Global Institute, 2018, *How will automation affect jobs, skills, and wages?* McKinsey & Company.

McKinsey Global Institute, 2017, *The Case for Digital Reinvention,* McKinsey & Company.

McKinsey Global Institute, 2017. *Artificial Intelligence the next Digital Frontier?* McKinsey & Company.

McKinsey Global Institute, 2017, *A Future That Works: Automation, Employment, and Productivity.* McKinsey & Company.

McKinsey Global Institute, 2017, *What the future of work will mean for jobs, skills, and wages: Jobs lost, jobs gained*. McKinsey & Company.

McKinsey Global Institute, 2017, *Jobs Lost, Jobs Gained: Workforce Transitions in a Time of Automation*. McKinsey & Company.

Ministero Dello Sviluppo Economico, 2017, *Piano Nazionale Industria 4.0: Investimenti, produttività e innovazione.*

Ministero Federale dell'Economia e dell'Energia (Germania), 2020, *Industrie 4.0 – Smart Manufacturing in Germany*.

Muller J.M. and Voigt K.-I., 2018*,* Sustainable industrial value creation in SMEs: a comparison between industry 4.0 and made in China 2025, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 5, pp. 659–670.

Nahavandi S., 2019, Industry 5.0—A human-centric solution. *Sustainability*, vol. 11, n. 6.

Narayanamurthy G. and Tortorella G., 2021, Impact of COVID-19 outbreak on employee performance–moderating role of industry 4.0 base technologies, *International Journal of Production Economics*, vol. 234.

Nazareno L. and Schiff D.S., 2021, *The impact of automation and artificial intelligence on worker well-being*, Technology in Society, vol. 67.

OECD, 2020, *Digital Economy Outlook, 2021*. *SpringerLink, Industry 4.0: A European Perspective.* OECD Publishing.

OECD, 2020, *Skills Outlook 2020: Learning for Life*, OECD Publishing.

OECD, 2020, *Going Digital in Italy: Challenges and opportunities*, OECD Report.

OECD, 2019, *Strengthening Active Labour Market Policies in Italy*, OECD Publishing.

OECD, 2019, *Occupational mobility, skills and training needs*, OECD Publishing.

OECD, 2018, *Automation, Skills Use and Training,* OECD Publishing.

OECD, 2018, *The Next Production Revolution: Implications for Governments and Business,* OECD Publishing.

OECD, 2017, *The Next Production Revolution: Implications for Governments and Business,* OECD Publishing.

Oyekanlu E.A., Alexander C. Smith, Windsor P. Thomas, Grethel Mulroy, Dave Hitesh, Matthew Ramsey, David J. Kuhn, Jason D. Mcghinnis, Steven C. Buonavita, Nickolus A. Looper, Mason Ng, Anthony Ng'oma, Weimin Liu, Patrick G. Mcbride, Michael G. Shultz, Craig Cerasi, And Dan Sun, 2020, A Review of Recent Advances in Automated Guided Vehicle Technologies: Integration Challenges and Research Areas for 5G-Based Smart Manufacturing Applications, *IEEE access* 8, pp. 202312-202353.

Petrik D. and Georg Herzwurm G., 2019, iIoT Ecosystem Development through Boundary Resources. A Siemens MindSphere Case Study, *Engineering*, pp. 1-6.

PwC Italia, 2021, *Digital Transformation in Italy: Industry 4.0 and its effects*.

PwC, 2018, *Industry 4.0: Building the digital enterprise.*

PwC, 2016, *Industry 4.0: Building the Digital Enterprise.* Global Industry 4.0 Survey.

Redazione Make Group, 2020, *Tecnologie abilitanti industria 4.0: definizione, benefici e rischi.*

Rodriguez F.S., Saleem K., Spilski J. and Lachmann T., 2021, Performance differences between instructions on paper vs digital glasses for a simple assembly task, *Applied Ergonomics*, vol. 94.

Rosa L., Freitas M., Mazo S., Monteiro E., Cruz T. and Simões P., 2019, A Comprehensive Security Analysis of a SCADA Protocol: From OSINT to Mitigation, IEEE, vol. 7, pp. 42156 – 42168.

Ross P. M., Scanes E., Locke W., 2023, Stress adaptation and resilience of academics in higher education. *Asia Pacific Education Review*, vol. 25, pp. 29–849.

Sarker I.H., Kayes A.S.M., Shahriar Badsha S., Alqahtani H., Watters P., and Ng A., 2020, Cybersecurity data science: an overview from machine learning perspective, *Journal of Big Data*, vol. 7, n. 41.

Sartal A., Bellas R., Mej_ıas A.M. and García-Collado A., 2020, The sustainable manufacturing concept, evolution and opportunities within Industry 4.0: A literature review*, Advances in Mechanical Engineering*, vol. 12, n. 5.

Satyro W. C., Cecília Maria Villas Bˆoas de Almeida, Marcos Jos´e A. Pinto Jr, Jos´e Celso Contador, Biagio F. Giannetti, Anderson Ferreira de Lima, Marco Aurelio Fragomeni, 2022, Industry 4.0 implementation: The relevance of sustainability and the potential social impact in a developing country*, Journal of Cleaner Production,* vol. 337.

Schneider S. and Kokshagina O., 2021, Digital transformation: what we have learned (thus far) and what is next, *Creativity and Innovation Management*, vol. 30, n. 2, pp. 384-411.

Schou C., Andersen R.S., Chrysostomou D., Bøgh S. and Madsen O., 2018, Skill-based instruction of collaborative robots in industrial setting*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 53, pp. 72-80.

Seghezzi F., 2017, Lavoro e competenze nel paradigma di Industria 4.0: inquadramento teorico e prime risultanze empiriche*, Bollettino Adapt,* vol. 1, n. 5, pp. 15-34.

SESEI, 2020, *Industrie 4.0: National Programs for Digital Transformation.*

Siemens, 2019, *Case Study: The Digital Enterprise – Amberg.*

Singh R. and Bhanot N., 2020, An integrated DEMATEL-MMDE-ISM based approach for analysing the barriers of IoT implementation in the manufacturing industry*, International Journal of Production Research*, vol. 58, n. 8, pp. 2454-2476.

Sociological Review, 2020, *Digitalization and the Changing Nature of Social Relationships.*

Stock T., Obenaus M., Kunz S. and Kohl H., 2018, Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: a qualitative assessment of its ecological and social potential, *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 118, pp. 254-267.

Sugiyama M., Deguchi H., Ema A., Kishimoto A., Mori J., Shiroyama H. and Scholz R.W., 2017, Unintended side effects of digital transition: perspectives of Japanese Experts, *Sustainability*, vol. 9, n. 12, pp. 21-93.

Schwab K., 2016, *The Fourth Industrial Revolution.* Crow Publishing.

Tao F. and Qi Q., 2019, Digital Twin and Big Data towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison*, Engineering*, vol. 6, pp. 3585–3593.

Toppel S. P., 2018, Understanding and Preventing Phishing Attacks: A Guide for Organizations. *Journal of Cybersecurity Education, Research and Practice*, vol. 1, n. 4.

Trappey A. J., Trappey C. V., Govindarajan U. H., Chuang A. C. & Sun J. J., 2017, A review of essential standards and patent landscapes for the Internet of Things: A key enabler for Industry 4.0, *Advanced Engineering Informatics,* vol. 33, pp. 208–229.

Tsai C.-H. and Huang J.-Y., 2018*,* Augmented reality display based on user behavior. *Computer Standards and Interfaces,* vol. 55, pp. 171–181.

Unioncamere & Ministero dello Sviluppo Economico (MISE), 2020, *Industria 4.0: Piano Nazionale Impresa 4.0 - Analisi e prospettive*.

Vaisanen A.J.K., Hyttinen M., Yl€onen S. and Alonen, L., 2019, Occupational exposure to gaseous and particulate contaminants originating from additive manufacturing of liquid, powdered, and filament plastic materials and related post-processes, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene,* vol. 16, n. 3, pp. 258–271.

Vrchota J., Pech M., Rolínek L. and Bednář J., 2020, Sustainability Outcomes of Green Processes in Relation to Industry 4.0 in Manufacturing: Systematic Review, Sustainability, vol. 12, n. 15.

Wagner T., Herrmann C., Thiede S., 2017, Industry 4.0 impacts on lean production systems, *Procedia*, vol. 63, pp. 125–131.

Wang L., Wu D., Rosen D.W., Schaefer D., 2015, Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation, *Enterprise Information Systems,* vol. 9, pp.1-14.

World Economic Forum, 2021, *The Future of Production: Opportunities and Risks.*

World Economic Forum, 2020, *The Future of Jobs Report 2020.*

World Economic Forum, 2018, *Future of Jobs*.

World Economic Forum, 2018, *Readiness for the Future of Production Report.*

Xu M., David J. M., Kim S. H., 2018, The fourth industrial revolution: Opportunities

and challenges*, International journal of financial research*, vol. *9, n. 2, pp. 90–95.*

Yoon H.-S., Lee J.-Y., Kim H.-S., Kim M.-S., Kim E.-S., Shin Y.-J., Chu W.-S. and Ahn S.-H., 2014, A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: review and case study, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green,* vol. 1, n. 3, pp. 261–279.

Zulkifli C.Z., Noor N.M. and Abu Hassan N.H., 2019, Performance Evaluation of Integrated Moisture with ZigBee Mesh Network for Automated Irrigation System, *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*.

SITOGRAFIA

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/it/MEMO_12_484;

https://bosch-presse.de/pressportal/de/en/bosch-combines-industry-4-0-with-ai-225414.html

https://www.adidas.it/?open-privacy-settings=gdpr&redirect-url=aHR0cHM6Ly93d3cuYWRpZGFzLml0L3NwZWVkZmFjdG9yeQ==

https://blogs.cisco.com/security/a-20-20-vision-for-cybersecurity;

https://it.pg.com

https://www.bmwgroup.com

https://www2.deloitte.com/il/en/pages/innovation/article/disruptive_vs_sustaining.html

https://www2.deloitte.com/us/en/insights/deloitte-review/issue-22/industry-4-0-technology-manufacturing-revolution.html

https://www.weforum.org/reports/the-future-of-jobs-report

https://www.istat.it/it/files/2019/07/Report-Livelli-di-istruzione-e-ritornioccupazionali_

https://www.istat.it/it/files/2020/08/REPORT_DIGITALIZZAZIONE_CENSIMPRESE

_PC.pdf

https://www.thedigitaltransformationpeople.com/channels/the-case-for-digital-transformation/renault-an-industry-4-0-case-study/

https://www.mckinsey.com/industries/consumer-packaged-goods/our-insights/inside-p-and-ampgs-digital-revolution

https://report.basf.com/2022/en/managements-report/our-strategy/our-targets.html

https://doi.org/10.1016/j.chieco.2018.07.008

https://www.researchgate.net/publication/322071988_World_Economic_Forum_White_Paper_Driving_the_Sustainability_of_ Production_Systems_with_Fourth_Industrial_Revolution_Innovation

https://webbylab.com/blog/how-iot-can-help-with-energy-management/

https://www.denso.com/global/en/news/newsroom/2023/20230518_g04/

https://recyclinginside.com/recycling-technology/separation-and-sorting-technology/zenrobotics-ai-based-robotic-waste-sorting-technologies-help-remeo-to-build-the-next-generation-materials-recovery-facility/

https://3dprintingindustry.com/news/mclaren-goes-beyond-prototyping-to-hit-new-f1-part-milestone-with-stratasys-3d-printing-214469/

https://www.libelium.com/iot-solutions/smart-water/

https://www.siemens.com/global/en/company/stories/industry/am-additivemanufacturing-3dprinting-textile-eos-dyemansion.html

https://www.tmcnet.com/topics/articles/2023/04/11/455541-impact-transportation-management-systems-route-optimization-fuel-efficiency.htm

https://nap.nationalacademies.org/read/22383/chapter/5

https://www.aboutamazon.com/news/sustainability/what-is-the-climate-pledge

https://www.apple.com/environment/pdf/Apple_CCF_Assurance_Statement_FY2020.pdf

https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2020/

https://www.ilo.org/it/publications/prospettive-occupazionali-e-sociali-nel-mondo-2021-il-ruolo-delle-0

https://www.itu.int/hub/2021/11/facts-and-figures-2021-2-9-billion-people-still-offline/

https://www.ilo.org/resource/other/skilling-re-skilling-digitalization-and-future-work

https://www.apa.org/monitor/2020/10/toll-job-loss

https://slideplayer.it/slide/10165919

https://www.bain.com/insights/factory-of-the-future-how-industry-4-0-and-ai-can-transform-manufacturing/

https://ec.europa.eu

http://ec.europa.eu/growth/content/digital-transformation-scoreboard-2017-0_en.

https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Home/home.html

RINGRAZIAMENTI

È giunto infine il momento dei ringraziamenti, che conclude ufficialmente il mio percorso di studi. Innanzitutto, vorrei esprimere la mia più sincera gratitudine al mio relatore, il Professor Panizzolo e al mio correlatore, il Dottor Dieste, per avermi guidato con grande pazienza e professionalità, nonché soprattutto comprensione verso la mia delicata situazione e avermi enormemente agevolato nella stesura di questa tesi. La loro costante disponibilità, i loro consigli saggi e illustri esperienze mi hanno permesso di superare momenti di difficoltà e dubbi, trasformando questa sfida in un'opportunità di crescita che porterò con sempre con me. Non posso non ringraziare tutti i miei amici che ho guadagnato nel corso della mia vita, in particolare Mattia, che l'hanno resa un fantastico cammino ricco di spensieratezza, gioie e supporto reciproco, e che non vedo l'ora di continuare a costruire assieme a tutti loro. Il mio più profondo ringraziamento va alla mia famiglia. Ai miei genitori, per il loro amore incondizionato, il loro sostegno morale ed economico, e per aver sempre creduto in me, anche nei momenti in cui io stesso dubitavo delle mie capacità. Senza di loro questo traguardo non sarebbe stato possibile. A mia madre, che mi ha sempre voluto un bene immenso e si è sempre presa cura di me in ogni momento dalla mia esistenza, e a mio padre, che con lo stesso sentimento mi ha insegnato i sani valori della vita, volevo esprimere la mia più profonda gratitudine per essere state sempre le figure primarie che mi hanno accompagnato in ogni fase della mia crescita, dando tutto loro stessi per farmi arrivare fin dove sono adesso. Un grazie sentito anche a mia sorella Maria, che mi ha sempre incoraggiato con la sua presenza e il suo affetto, supportandomi in ogni fase di questo lungo percorso e completando la mia infanzia con giochi, litigi e solidarietà fraterna. Un ringraziamento sincero va anche ai professori, ricercatori e colleghi che ho incontrato durante il mio percorso accademico. Grazie per aver condiviso le vostre conoscenze, per avermi spronato a migliorare e per avermi fatto scoprire nuove prospettive e orizzonti. Ognuno di voi ha lasciato un segno indelebile nel mio percorso formativo, di cui avrò sempre un grato ricordo. Vorrei ringraziare inoltre tutte quelle persone che, anche con un semplice gesto o una parola di incoraggiamento, hanno contribuito a farmi arrivare fino a questo momento, in particolar modo il compagno di mia madre, Enrico, che ha prestato un grande aiuto alla mia famiglia in un periodo difficile. Ognuno di voi ha avuto un ruolo importante nel mio cammino e vi porto dentro di me. Grazie a tutti per aver reso questi anni di studio più arricchenti e significativi. A voi, la mia vita, dedico questo lavoro, frutto di sacrifici, passione e impegno.