

Corso di laurea in Economia e Management

Cattedra di Macroeconomia e Politica Economica

Implementazione  
dell'AI nelle imprese  
manifatturiere: il caso  
del settore  
automobilistico

Prof. Tatiana Cesaroni

---

RELATORE

Laura Grimaldi  
Mat. 278831

---

CANDIDATO

## INDICE

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
<b>Capitolo 1 - Intelligenza Artificiale e Imprese: Evoluzione e Applicazioni .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Storia e sviluppo dell'Intelligenza Artificiale .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1.1 Dalle origini ai giorni nostri: tappe fondamentali .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1.2 Principali tecnologie e modelli di AI.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2 Le imprese manifatturiere nel contesto economico attuale .....</b>	<b>7</b>
<b>1.2.1 Digitalizzazione e innovazione tecnologica .....</b>	<b>8</b>
<b>1.2.2 Sfide e opportunità della trasformazione digitale.....</b>	<b>9</b>
<b>1.3 Applicazioni dell'AI nelle imprese manifatturiere .....</b>	<b>11</b>
<b>1.3.1 Intelligenza Artificiale e ottimizzazione della supply chain .....</b>	<b>11</b>
<b>Capitolo 2 – Evidenze Empiriche sul Commercio .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Teorie economiche sull'adozione dell'Intelligenza Artificiale.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.1 Impatto dell'AI sui modelli di produzione e commercio internazionale .</b>	<b>13</b>
<b>2.1.2 AI e trasformazione del mercato del lavoro.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 AI e commercio internazionale: prospettive e criticità.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1 L'AI nell'export: ottimizzazione dei processi e riduzione dei costi.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.2 Rischi legati all'adozione dell'AI nel commercio globale.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.3 Regolamentazione ed implicazioni etiche dell'AI nei mercati internazionali</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Evidenze empiriche sull'uso dell'AI nelle imprese europee .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.1 Settori maggiormente coinvolti .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.2 Studi recenti sul tema nelle aziende esportatrici .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.3 Prospettive future e scenari di sviluppo .....</b>	<b>23</b>
<b>Capitolo 3 – Caso Studio: L'AI nell'Industria Automobilistica .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Scelta del caso studio e metodologia di analisi.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1.1 Motivi della selezione del settore automobilistico.....</b>	<b>26</b>

3.2	<i>L'implementazione dell'AI in un'azienda automobilistica esportatrice.....</i>	30
3.2.1	<i>Presentazione dell'azienda e contesto operativo .....</i>	30
3.2.2	<i>Soluzioni AI adottate: dalla produzione alla logistica .....</i>	32
3.2.3	<i>Risultati ottenuti e impatti sul commercio estero .....</i>	36
3.3	<i>Considerazioni finali sul caso studio e spunti di riflessione.....</i>	39
3.3.1	<i>Vantaggi e svantaggi dell'implementazione.....</i>	39
3.3.2	<i>Prospettive future per l'AI nell'industria automobilistica.....</i>	41
	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>43</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>45</b>

## INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, l'intelligenza artificiale (AI) si è affermata come una delle innovazioni più rivoluzionarie e significative dell'economia globale. Essa incide radicalmente non soltanto sui processi produttivi, ma anche sulle logiche di competizione e sui rapporti tra le aziende stesse ed il mercato. L'utilizzo di sistemi intelligenti, infatti, non comporta soltanto un miglioramento dell'efficienza: è possibile ridisegnare le catene del valore, i modelli di business e gli assetti amministrativi, andando ad influenzare direttamente la produttività e l'apertura ai mercati internazionali. In particolar modo, le aziende del comparto manifatturiero ed esportatrici risultano essere quelle più interessate da questi cambiamenti: ad oggi, la capacità di competere a livello internazionale di un'azienda si misura soprattutto in relazione alla velocità con cui questa è in grado di adattarsi all'utilizzo di nuove tecnologie per rispondere ad una domanda globale che muta sempre più rapidamente.

In quest'ottica, al fine di rendere i processi industriali più flessibili, resilienti e sostenibili, il paradigma della cosiddetta "Industria 4.0" fonda le sue radici proprio nell'utilizzo dell'AI. Quest'ultimo si configura come un modello preposto a combinare automazione, digitalizzazione ed interconnessione: le industrie manifatturiere, da sempre colonna portante dello sviluppo economico, si trovano ora ad affrontare sfide complesse. La trasformazione digitale messa in atto dall'implementazione dell'intelligenza artificiale non mira soltanto a ridurre tempi e costi, ma a ripensare l'intera organizzazione aziendale in chiave digitale. Nonostante le difficoltà iniziali, come la scarsità di competenze, i costi di investimento e le vulnerabilità informatiche, studi e dati concreti dimostrano che i benefici di cui le aziende possono avvalersi sono altrettanto numerosi: ottimizzazione della supply chain, miglioramento della qualità dei prodotti e, soprattutto, rafforzare la competitività nei mercati esteri.

Oltre alle grandi potenzialità, però, è importante considerare anche quelli che sono i limiti e le contraddizioni propri dell'utilizzo dell'AI in ambito economico. La sua diffusione, infatti, rischia di accentuare squilibri già esistenti: le economie più avanzate e le imprese di grandi dimensioni riescono a sfruttarla in misura nettamente maggiore, a discapito dei paesi in via di sviluppo che stentano invece a stare al passo con le novità. A questa asimmetria, poi, si aggiungono ulteriori questioni di carattere etico e legale, le quali

riguardano principalmente la tutela dei dati, la trasparenza delle decisioni prese dai sistemi automatizzati e la definizione delle responsabilità imputabili quando un algoritmo commette degli errori. Pertanto, per far sì che l'IA non crei nuove disuguaglianze, emerge la necessità di un quadro regolatorio condiviso a livello internazionale, costituito da regole chiare, in grado di garantirne un utilizzo responsabile, duraturo ed orientato alla sostenibilità.

Questo elaborato, quindi, si propone di analizzare in maniera ordinata tali dinamiche, attraverso un percorso che combina ricostruzione teorica, analisi empirica e osservazione diretta. Il primo capitolo è dedicato all'evoluzione storica dell'AI e alle sue principali applicazioni nel settore manifatturiero, con attenzione ai processi di digitalizzazione e alle sfide poste dalla cosiddetta Industria 4.0. Il secondo capitolo affronta il legame tra AI e commercio internazionale, mettendo in luce gli effetti su produttività, lavoro ed export, ma anche i rischi di squilibri economici e sociali. Il terzo capitolo, infine, sviluppa il caso studio del BMW Group, che offre un esempio concreto di come l'intelligenza artificiale possa incidere sulla produzione e sulla logistica, rafforzando la competitività internazionale ma al tempo stesso ponendo nuove sfide gestionali e regolatorie.

L'obiettivo finale è dunque duplice: da un lato si vuole cercare di comprendere come l'intelligenza artificiale si integri nelle dinamiche di sviluppo industriale e nelle strategie di esportazione; e, dall'altro, mostrare i vantaggi e le criticità di un cambiamento che, se gestito in modo oculato, può diventare un motore fondamentale di crescita economica e di sviluppo sostenibile.

## **Capitolo 1 - Intelligenza Artificiale e Imprese: Evoluzione e Applicazioni**

### **1.1 Storia e sviluppo dell'Intelligenza Artificiale**

#### **1.1.1 Dalle origini ai giorni nostri: tappe fondamentali**

Per "intelligenza artificiale" (IA) si intendono quei sistemi che mostrano un comportamento intelligente analizzando il proprio ambiente e compiendo azioni, con un certo grado di autonomia, per raggiungere obiettivi specifici" (Commissione Europea, 2018).

Pertanto, considerando un'accezione più ampia, l'AI è definibile come una specifica area di studio che si propone di superare i limiti dell'informatica: essa, infatti, si riferisce all'abilità di una macchina di superare i problemi e, in generale, agire in modo analogo a quello degli esseri umani. Quindi, non si tratta solo di un'intelligenza basata sulla capacità di calcolo o sull'elaborazione di dati, ma di un sistema in grado di integrare diverse forme di intelligenza proprie dell'essere umano, dalla cognizione spaziale alla riflessione introspettiva (Somalvico, 1992).

Tuttavia, c'è da precisare che tale definizione non è univoca: l'AI è stata studiata ed interpretata da diversi punti di vista e ciascuno di essi ha tenuto in considerazione altrettanti elementi chiave (Portinale, 2021). In particolar modo, i primi due parametri considerati per iniziare un processo di sviluppo dell'AI sono stati: i processi di pensiero e di ragionamento da un lato, e il comportamento dall'altro (Marmo, 2024). Successivamente, per questi due aspetti si è discusso su come far operare il sistema: alcuni studiosi hanno prediletto un'accezione tale per cui il successo si misura in base a un'esecuzione umana, facendo sì che l'AI si avvicinasse alle scienze empiriche, richiedendo quindi la verifica delle ipotesi; altri, invece, hanno adoperato come metodo di paragone il concetto ideale di intelligenza, comunemente chiamato razionalità (Somalvico, 1992). La dualità di questi approcci, pertanto, spiega perché l'Intelligenza Artificiale è un ambito che è stato fortemente influenzato da numerose discipline quali la filosofia, la matematica, l'economia, le neuroscienze, la psicologia, la cibernetica, le scienze cognitive e la linguistica (Longo, 2015).

Un altro aspetto particolarmente rilevante che emerge da queste definizioni è che lo scopo dell'Intelligenza Artificiale non è quello di replicare l'intelligenza umana, come si pensa

comunemente, bensì soltanto di emularne o riprodurne alcune funzioni (Russell & Norvig, 2021). In virtù di ciò, risulta evidente che gli studiosi hanno valutato volta per volta diversi modelli della razionalità umana, scegliendo quello più opportuno. I modelli di razionalità adottati sono stati sia di tipo antropomorfo (ossia modelli che consentono non soltanto di ottenere prestazioni analoghe a quelle dell'uomo ma anche di adottare gli stessi metodi usati dall'uomo), sia di tipo non antropomorfo, con l'obiettivo di garantire i migliori risultati possibili.

A dispetto di quanto si potrebbe pensare, l'IA ha natali tutt'altro che recenti: infatti, già nella prima metà del XVII secolo, alcuni matematici come Blaise Pascal costruirono delle macchine in grado di effettuare calcoli in maniera automatica. Tuttavia, solo nel 1943 venne realizzato quello ciò che viene ritenuto il primo lavoro inerente all'intelligenza artificiale: in un paper accademico, lo psicologo cognitivo Walter Pitts e l'esperto di cibernetica Warren McCulloch mostrarono come un sistema di neuroni artificiali potesse apprendere nella medesima maniera in cui imparano gli esseri umani (Schiaffonati, 2010). In questo sistema, lo stato dei neuroni artificiali poteva essere "acceso" oppure "spento", con un passaggio ad "acceso" in presenza di stimoli causati da un numero sufficiente di neuroni circostanti. Così facendo, essi dimostrarono che qualsiasi funzione computabile può essere rappresentata da qualche rete di neuroni. È il primo modello matematico di rete neurale artificiale, ma all'epoca non c'erano né i dati né il potere computazionale per mettere in pratica la teoria. Sette anni più tardi, intorno agli anni 50, vennero sviluppati i primi prototipi di reti neurali funzionanti, ossia algoritmi matematici che avevano l'obiettivo di riprodurre il funzionamento dei neuroni biologici (Shalev-Shwartz & Ben-David, 2014).

Successivamente, un ulteriore passo verso ciò che sarebbe diventata l'Intelligenza Artificiale vera e propria fu fatto dallo scienziato Alan Turing attraverso il suo celebre Test. Quest'ultimo venne proposto nel 1950 e consisteva in un esperimento in cui un giudice (C) deve distinguere tra un uomo (A) e una donna (B) basandosi solo su risposte dattiloscritte. A deve ingannare C, mentre B deve aiutarlo. Se al posto di A si sostituisce una macchina e il giudice non riesce a distinguerla da un essere umano, allora la macchina può essere considerata intelligente. Questo criterio è alla base dell'Intelligenza Artificiale. Nel 1956, la conferenza di Dartmouth segnò ufficialmente la nascita dell'AI come disciplina accademica: nel New Hampshire, al Dartmouth College, si tenne un convegno

a cui presero parte ricercatori come John McCarthy, Marvin Minsky, Claude Shannon e Nathaniel Rochester. Fu proprio lo stesso McCarthy, durante la conferenza, ad introdurre per la prima volta il termine Intelligenza Artificiale. Lo scopo dell'incontro era indagare sulla possibilità di creare macchine che emulassero l'intelligenza umana. Vennero introdotte nozioni determinanti per lo sviluppo futuro, quali l'apprendimento meccanico, la rete neurale e l'automatizzazione delle soluzioni. Inizialmente le aspettative erano vistose, ma i progressi non corrisposero alle speranze; l'importante era, però, di avere sboccato un varco alla scienza e cominciato a delineare le basi per imponenti sviluppi.

A seguito della conferenza, vi furono numerosi altri progressi per la materia che segnarono una vera e propria epoca dell'oro: un esempio è il GPS, ideato agli inizi degli anni '60 con lo scopo di imitare i processi di risoluzione dei problemi utilizzati dagli esseri umani. Un altro contributo particolarmente rilevante che si ebbe in quegli anni fu ad opera nuovamente di McCarthy. Egli, infatti, sviluppò il Lisp: il linguaggio di programmazione dominante per la realizzazione dei sistemi di intelligenza artificiale (Russell & Norvig, 2021). Infine, nel 1966, nasce Eliza, il primo chatbot della storia. Nato per fare la parodia di uno psicologo di una scuola dell'epoca, Eliza si limitava a ripetere le affermazioni dei suoi interlocutori in forma di domanda (IBM, 2023).

Nonostante il periodo particolarmente florido che caratterizzò lo sviluppo dell'IA a cavallo tra il 1950 e la seconda metà degli anni '60, durante il decennio successivo si verificò una notevole battuta di arresto, conosciuta come "AI Winter". In particolar modo, non vennero rispettate le aspettative esageratamente elevate che furono prefissate: questo portò, inevitabilmente, ad una drastica riduzione degli investimenti effettuati. Un periodo analogo si verificò anche alcuni anni più tardi, ma con una risonanza minore.

I primi segni di ripresa si avvertirono agli inizi degli anni '80: nel 1981 in Giappone venne annunciato il progetto Fifth Generation, un piano di dieci anni con l'intento di costruire sistemi intelligenti basati su Prolog e nel 1982 fu utilizzato per la prima volta un sistema di intelligenza artificiale in ambito commerciale (Marmo, 2024).

Un altro episodio di notevole importanza si verificò il 10 febbraio 1996 quando, a Philadelphia, fu disputata e vinta la prima partita di scacchi in cui l'avversario era il computer Deep Blue. Quest'ultimo fu finanziato dal governo giapponese e non si trattava di una rete neurale, ma un'intelligenza artificiale simbolica all'interno della quale sono state codificate tutte le regole degli scacchi e le mosse da eseguire in ogni situazione.

Ad oggi, l'anno che ha cambiato il decorso dell'Intelligenza Artificiale è stato sicuramente il 2020. La società OpenAI ha presentato per la prima volta GPT-3, ovvero il suo sistema di "elaborazione del linguaggio naturale" addestrato tramite 800 gigabyte di dati e dotato di 200 miliardi di parametri. Chat GPT-3 è stato lanciato sul mercato il 30 novembre 2022 ed ha mostrato notevoli risultati nel generare testo simile a quello elaborato da persone e nell'intrattenere conversazioni (Stanford AI Index, 2023).

### 1.1.2 Principali tecnologie e modelli di AI

L'Intelligenza Artificiale, data la sua complessità, può trovare applicazione ed essere declinata in diversi modi. In particolare, a seconda dei fini ultimi del suo utilizzo, possiamo distinguere:

- L'apprendimento automatico, meglio noto come *Machine Learning* (ML). Questo nasce come una vera e propria branca dell'Intelligenza Artificiale, tant'è vero che anche i loro natali sono strettamente correlati: i primi studi riconducibili al ML si hanno agli inizi degli anni '50 con le reti neurali; successivamente, fu lo stesso Alan Turing ad introdurre il concetto di «macchina che apprende». Infatti, l'apprendimento automatico consiste proprio in questo: la scienza di far apprendere i dati al computer autonomamente, ovvero senza che sia stato esplicitamente programmato con delle regole, ma attraverso l'utilizzo di algoritmi e di pattern (Lodi, 2014). Il suo obiettivo ultimo, quindi, è quello di affrontare problemi risolvibili di natura pratica.
- L'apprendimento profondo, o *deep learning*. Direttamente collegato al concetto di machine learning e di Intelligenza Artificiale, il deep learning consiste in un insieme di tecniche basate su reti neurali artificiali organizzate in diversi strati, dove ogni strato calcola i valori per quello successivo affinché l'informazione venga elaborata in maniera sempre più completa (Osservatori Digital Innovation, n.d.). La principale differenza con i modelli di apprendimento automatico è che questi utilizzano reti neurali semplici con uno o due livelli computazionali, mentre i programmi di deep learning utilizzano tre o più livelli, ma in genere centinaia o migliaia di livelli, per addestrare i modelli. Date queste sue caratteristiche, ad oggi il Deep Learning

costituisce una delle principali fonti di successo per l'ambito dell'Intelligenza Artificiale (IBM, 2024).

- L'elaborazione del linguaggio naturale. Questo ambito comporta il trattamento automatico di informazioni scritte o parlate in linguaggio naturale tramite l'utilizzo di un computer (Sinopoli et al., 2023).
- La visione artificiale, anche nota come *Computer Vision*. Essa cerca di riprodurre funzioni e processi propri dell'apparato visivo umano attraverso l'implementazione di tecniche di deep learning e di reti neurali. In particolar modo, un sistema di visione artificiale integra due aree chiave: l'elaborazione delle immagini e il riconoscimento di pattern. Insieme, questi campi permettono la creazione di algoritmi capaci di interpretare dati spaziali, conducendo a ciò che è noto come "comprensione delle immagini" (Gendy & Patel, 2024). Il suo scopo primario, quindi, è replicare le capacità della visione umana permettendo alle macchine di riconoscere oggetti, comprendere le scene ed interpretare i segnali visivi (Suma, Patil & Sunitha, 2024).
- I sistemi esperti. Si tratta di software basati sulla conoscenza capaci di risolvere problemi in domini specifici, e possono raggiungere o superare le prestazioni di un esperto umano grazie a knowledge base e motori di inferenza (Tzafestas, Kokkinaki & Valavanis, 1991).

## **1.2 Le imprese manifatturiere nel contesto economico attuale**

Le imprese manifatturiere sono aziende del settore secondario, la cui attività consiste nella trasformazione di beni primari o semilavorati in prodotti finiti destinati al consumo. In termini teorici, tali aziende utilizzano una combinazione di lavoro umano, sistemi automatizzati, processi chimici, strumenti e sistemi analoghi per generare beni tangibili su scala industriale (Micelli, 2001).

Sebbene il loro sviluppo sia frutto di una serie di trasformazioni economiche, sociali e tecnologiche protese nel corso dei secoli, l'affermazione dell'industria manifatturiera si ha a seguito della prima rivoluzione industriale. A partire dal Settecento, infatti, è possibile osservare la crescita dei primi addensamenti industriali, i quali si occupavano soprattutto di manifatture tessili (Colli, 2012).

Ad oggi, nel contesto economico italiano, il settore manifatturiero riveste un ruolo di primo piano. Esso contribuisce in misura significativa al prodotto interno lordo nazionale (circa un sesto del PIL) e all'occupazione (con una quota simile di addetti) (Istat, 2017). In particolar modo, l'Italia si caratterizza per una diffusa presenza di piccole e medie imprese che collaborano tra di loro costituendo dei veri e propri distretti industriali specializzati in diversi ambiti. I settori più rinomati a livello mondiale sono la moda, il design, il lusso ma anche il food.

### **1.2.1 Digitalizzazione e innovazione tecnologica**

Come già detto in precedenza, le industrie manifatturiere italiane sono un pilastro dell'economia nazionale, con un impatto significativo su innovazione e occupazione. Nonostante ciò, ad oggi esse si trovano ad affrontare uno dei momenti più sfidanti della loro storia, caratterizzato da dinamiche di mercato complesse, dalla forte concorrenza globale e da una rapida evoluzione tecnologica. In questo contesto, la digitalizzazione del comparto manifatturiero (cosiddetta "industria 4.0") ha assunto un ruolo centrale consentendo alle imprese manifatturiere di cogliere queste sfide e trasformarle in opportunità (Salviotti, 2017).

In generale, con digitalizzazione ci si riferisce al processo di trasformazione dei processi analogici in processi digitali; ad esso viene affiancato, nel panorama aziendale globale, il fenomeno della trasformazione digitale, ovvero l'uso delle tecnologie digitali per creare o modificare i processi aziendali, la cultura e l'esperienza dei clienti esistenti o dei dipendenti, al fine di soddisfare i requisiti aziendali e di mercato in continua evoluzione (Ciffolilli & Muscio, 2018). Entrambi questi aspetti si vanno poi ad inserire in un contesto più ampio, appunto quello dell'Industria 4.0: un progetto di matrice tedesca, successivamente adottato anche a livello europeo. In particolar modo, l'industria 4.0 rimanda al concetto di quarta rivoluzione industriale e ha come obiettivo quello di digitalizzare tutto ciò che circonda l'uomo, dai macchinari utilizzati nelle fabbriche fino agli oggetti di uso più comune, combinando assieme mondo fisico e mondo virtuale e modellando un ecosistema totalmente digitale (MISE, 2017). In pratica, l'industria 4.0 mira a introdurre strumenti innovativi (dai sensori ai sistemi di analisi dei dati)

all'automazione industriale tradizionale per migliorare la produttività e la qualità del prodotto, ottimizzando contemporaneamente le condizioni di lavoro del personale (Innovation Post, 2020).

In Italia, l'Industria 4.0 è stata incentivata da misure di politica industriale volte a sostenere la transizione digitale delle imprese, come il Piano Nazionale Industria 4.0: questo “prevede un insieme di misure organiche e complementari in grado di favorire gli investimenti per l'innovazione e per la competitività” (MISE, 2017), in modo da offrire “un supporto negli investimenti, nella digitalizzazione dei processi produttivi, nella valorizzazione della produttività dei lavoratori, nella formazione di competenze adeguate e nello sviluppo di nuovi prodotti e processi” (MISE, 2017). Infatti, le c.d. “tecnologie abilitanti”, ovvero le innovazioni chiave previste dal piano nazionale, sono suddivise in nove macrocategorie ed includono: le soluzioni di manifattura avanzata, la manifattura additiva, la realtà aumentata, la simulazione, l'integrazione orizzontale/verticale, l'Internet of Things (IoT), i sistemi di cloud computing, cyber-security, e-business continuity, big data e analytics (Ministero delle Imprese e del Made in Italy, Piano nazionale Industria 4.0).

### **1.2.2 Sfide e opportunità della trasformazione digitale**

L'effettiva implementazione del Piano Nazionale Industria 4.0 porta con sé una lunga serie di benefici attesi che, coerentemente con il fine ultimo del piano stesso, promettono di migliorare ed incrementare i risultati futuri dalle imprese che vi aderiscono (Assolombarda, 2023). Questi, nello specifico, sono (MISE, 2017):

- **Flessibilità:** grazie all'integrazione di sistemi intelligenti, supportati da robot collaborativi e linee produttive modulari, le imprese sono in grado di adattare e riconfigurare i propri processi in base alle variazioni della domanda o alla necessità di diversificazione del prodotto (Szalavetz, 2021; Gorecky et al., 2014). Tale flessibilità consente, quindi, sia di passare rapidamente da un prodotto all'altro ma anche di adattarsi più rapidamente alle esigenze dei consumatori.
- **Velocità:** strettamente collegata con il punto precedente, l'integrazione end-to-end dei dati, dal fornitore fino al cliente, permette di accelerare l'innovazione e ridurre

il time-to-market (il tempo di immissione sul mercato di nuovi prodotti) attraverso cicli di sviluppo più rapidi e prototipazione digitale (Dgroove, 2023).

- **Produttività:** grazie all'automazione avanzata, al miglior impiego delle risorse e all'uso di dati per prendere decisioni informate in tempo reale, la produzione diventa più veloce, continua e ottimizzata. Studi di settore stimano che l'Industria 4.0 possa incrementare la produttività aziendale in media del 15–30% (McKinsey, 2018) e, contestualmente, ridurre i costi operativi di circa il 4–5% all'anno (PwC, 2016).
- **Qualità:** tramite l'utilizzo di sistemi di monitoraggio e di controlli automatizzati, si individuano difetti durante la produzione e si attuano correzioni prima che i problemi impattino il cliente finale (Innovation Post, 2023).
- **Competitività del prodotto:** tutti gli aspetti fino ad ora analizzati consentono, nel loro complesso, di aumentare la quota di mercato dell'azienda e ciò contribuisce a rendere la stessa più competitiva.

Parimenti ai benefici, la transizione verso l'Industria 4.0 comporta anche diverse sfide e criticità che le imprese devono affrontare. Gli aspetti più rilevanti sono:

- **Costi ed investimenti elevati:** la transizione richiede ingenti risorse finanziarie e costi iniziali notevoli. I produttori stimano di dover investire circa il 5% del proprio fatturato in tecnologie digitali (The European House – Ambrosetti & Workday, 2022) e il 43% delle aziende cita la carenza di budget adeguati come maggiore ostacolo ai progetti di digitalizzazione (Licata, 2024). Ovviamente, questo tipo di investimenti grava soprattutto sulle piccole e medie imprese che generalmente dispongono di risorse finanziarie limitate.
- **Competenze e formazione del personale:** affinché dei sistemi avanzati siano introdotti in fabbrica, è indispensabile un personale con competenze tecniche aggiornate. Le imprese, di conseguenza, devono provvedere alla formazione del personale già presente oppure ricorre all'assunzione di figure specializzate come data analyst, ingegneri informatici, esperti di AI, che ad oggi sono risorse molto richieste e difficilmente reperibili sul mercato (McKinsey, 2018).
- **Sicurezza informatica:** data la forte presenza di una componente digitale, le imprese sono sempre più esposte ad attacchi cyber. Pertanto, è cruciale affiancare alla trasformazione digitale un solido piano di sicurezza informatica: proteggere le

reti industriali con firewall e sistemi di rilevamento intrusioni, cifrare i dati sensibili, aggiornare regolarmente i software industriali e formare il personale sulle pratiche di sicurezza (Dgroove, 2023).

### **1.3 Applicazioni dell'AI nelle imprese manifatturiere**

Dopo aver spiegato nel dettaglio in cosa consiste l'Intelligenza Artificiale e le sue varie sfaccettature, questo paragrafo si propone di illustrare concretamente i processi delle imprese manifatturiere in cui può essere applicata e quali potrebbero essere eventuali implicazioni.

#### **1.3.1 Intelligenza Artificiale e ottimizzazione della supply chain**

L'elemento chiave di ogni organizzazione è la *supply chain*, nota anche come “*catena di approvvigionamento*”. Essa, infatti, consente alle aziende di coordinare attività, risorse e soggetti coinvolti nella produzione e distribuzione di un prodotto o servizio; pertanto, comprende diverse fasi quali approvvigionamento, produzione e distribuzione (Kumar, 2023).

In questo contesto, l'AI può intervenire sotto molteplici punti di vista. Bisogna precisare, però, in ambito di logistica e gestione della supply chain gli strumenti digitali sono già utilizzati da decenni (Boute & Udenio, 2021): tuttavia, il recente sviluppo dell'Intelligenza Artificiale ha fatto sì che questi processi fossero ulteriormente migliorati e addirittura automatizzati. Gli aspetti in questione sono (Shoushtari, Ghafourian & Talebi, 2022):

1. Previsione della domanda (*Demand forecasting*): l'AI può essere utilizzata per analizzare grandi quantità di dati storici in modo da prevedere in maniera più accurata la domanda futura. Così facendo, questo consente di ottimizzare la gestione delle scorte e di evitare l'esaurimento delle merci (Shoushtari, Ghafourian & Talebi, 2022; Kumar, 2023).

2. Gestione Intelligente delle Scorte: automatizzando del tutto questa fase, l'intelligenza Artificiale può gestire in autonomia il magazzino riducendo i costi di stoccaggio e migliorando il servizio clienti (Kumar, 2023; Boute & Udenio, 2020).
3. Trasporti e logistica: gli algoritmi di AI sono in grado di ottimizzare i trasporti, scegliendo i tragitti più brevi e riducendo così i tempi di consegna. Questo consente all'organizzazione sia di ridurre i costi legati alla logistica ma anche di rendere le proprie prestazioni più sostenibili (Boute & Udenio, 2020).
4. Analisi dei rischi e supporto alle decisioni (*Risk Management*): attraverso l'analisi di indicatori di performance, di dati di mercato e di altri flussi di dati, gli algoritmi possono facilmente individuare eventuali rischi e anomalie createsi lungo la catena di approvvigionamento (Kumar, 2023; Shoushtari, Ghafourian & Talebi, 2022). Attraverso dei sistemi di sorveglianza in tempo reale, è possibile prevenire, identificare e fermare elementi di disturbo prima che questi si manifestino o si aggravino (Shekhar et al., 2024). Inoltre, l'Intelligenza Artificiale può essere di grande supporto alle organizzazioni anche nei processi di *decision making*, facilitando l'adozione di meccanismi di risposta ai problemi e suggerendo strategie innovative (Capgemini, 2021).

Gli aspetti riportati sono soltanto alcune delle forme in cui l'AI opera attualmente nei processi propri della supply chain. Tuttavia, è importante rilevare altri due ambiti di applicazione che ad oggi sono ancora in fase sperimentale ma che in futuro potrebbero fornire un grande contributo alle aziende: la manutenzione predittiva e l'automazione intelligente dei processi operativi. La prima si riferisce più concretamente alla capacità dell'Intelligenza Artificiale di monitorare in tempo reale le condizioni dei macchinari e delle attrezzature utilizzate in modo da anticipare guasti e programmare interventi di manutenzione (SAP, 2024). La seconda, invece, fa riferimento a quelli che sono i futuri risvolti dell'implementazione dell'AI nella supply chain: si prospetta, infatti, che con l'utilizzo dell'AI le catene di approvvigionamento diventeranno più autonome e richiederanno sempre di meno l'intervento umano (Shekhar et al., 2024). Ciò consentirebbe alle aziende di migliorare le proprie prestazioni ma, più in generale, di adattarsi meglio al contesto globale nel quale operano.

## Capitolo 2 – Evidenze Empiriche sul Commercio

### 2.1 Teorie economiche sull'adozione dell'Intelligenza Artificiale

Se nel capitolo precedente si è trattato principalmente delle varie forme e paradigmi che l'Intelligenza Artificiale è in grado di assumere, in questo paragrafo si intende analizzare gli effetti sistemici che tale tecnologia genera sui modelli produttivi e sulle dinamiche internazionali.

#### 2.1.1 Impatto dell'AI sui modelli di produzione e commercio internazionale

Per quanto riguarda l'integrazione dell'AI nei processi industriali, come illustrato nel capitolo precedente, è noto che questa ha apportato alle industrie benefici tali da essere considerata la chiave dell'industria 4.0. Infatti, l'Intelligenza Artificiale può essere implementata in numerosi ambiti e a supporto di specifici compiti, ad esempio: controllo di qualità, risk management, gestione del magazzino, manutenzione, previsione della domanda, ecc. Tuttavia, emergono anche alcuni ostacoli che limitano la sua effettiva realizzazione e minano il suo ambito di applicazione. La scarsa quantità di dati, la mancanza di competenze specifiche e di esperienze dirette sono gli aspetti maggiormente rilevanti (Cannas et al., 2024).

Parallelamente, l'AI influisce anche sulle dinamiche commerciali a livello globale, promuovendo la competitività internazionale. Aumentando la produttività di coloro che la utilizzano, tramite il miglioramento della *supply chain* e l'utilizzo dei processi di *smart factoring*, l'AI contribuisce a ridurre i costi commerciali, migliorare la logistica e la diffusione di innovazioni digitali su scala globale (Ferencz et al., 2022). In particolar modo, considerando i dati di commercio risalenti al periodo 2002-23, è possibile osservare una correlazione positiva tra l'esposizione di un'impresa all'AI e il suo numero di esportazioni, pari in media ad un incremento di circa 31% (Zhou, Wang, Cao, & Li, 2025). Tuttavia, tale effetto sarebbe uniforme riguardando principalmente le economie avanzate, mentre per i paesi meno sviluppati risulterebbe invece correlato allo stato delle infrastrutture e delle competenze (Zhou et al., 2025).

A supporto di quanto detto fin ora, uno studio condotto tra il 2018 e il 2022 utilizzando dati aggregati nazionali ha sviluppato un modello volto ad analizzare la relazione tra i livelli di digitalizzazione ed intensità di AI nei processi produttivi e l'effetto che questi hanno sul commercio internazionale. I risultati hanno mostrato che un aumento dell'1% dei primi comporta un aumento delle esportazioni compreso tra l'1,01% e l'1,30%, concludendo che l'intensità della digitalizzazione e dell'AI sono determinanti del successo di un paese in ambito di esportazioni nei mercati internazionali (Lo & Lee, 2024).

### **2.1.2 AI e trasformazione del mercato del lavoro**

La crescente adozione di sistemi intelligenti ha posto il mercato del lavoro di fronte a una profonda transazione, ridefinendo i ruoli, le competenze e le modalità occupazionali. Infatti, se da un lato sostituisce mansioni routinarie, dall'altro genera nuove opportunità e profili professionali, alterando gli equilibri occupazionali a livello globale (Zhou et al., 2025; ILO, 2023).

Secondo diversi studi, l'AI contribuisce significativamente all'aumento dei posti di lavoro tramite due aspetti principali: l'aumento della produttività e la creazione di nuove mansioni (Acemoglu et al., 2025). Secondo Acemoglu e Restrepo (2019), infatti, l'automazione comporta da un lato l'eliminazione di alcune occupazioni svolte da esseri umani (*displacement effect*) e dall'altro la nascita di nuove mansioni che richiedono competenze differenti (*reinstatement effect*). L'impatto sull'occupazione è dato dal bilanciamento tra questi due effetti.

Tali assunzioni sono confermate anche da uno studio condotto da Shen et al. (2024), utilizzando dati che riportano l'occupazione in Cina tra il 2006 e il 2020. Da questo è emerso che l'adozione di tecnologie intelligenti non solo compensa la perdita di alcuni ruoli, ma genera nuovi posti di lavoro "in eccesso": tale fenomeno è stato definito "*icing on the cake*"<sup>1</sup>. Inoltre, lo studio evidenzia anche che il ruolo positivo dell'AI nella promozione dell'occupazione genera maggiori benefici per le lavoratrici e per i

---

<sup>1</sup> Traducibile in italiano come "la glassa sulla torta", fa riferimento a un beneficio aggiuntivo a qualcosa che è già considerato positivo.

lavoratori impiegati nei settori ad alta intensità di manodopera, riducendo al contempo la quota complessiva di lavoratori maschi nel settore manifatturiero (Shen et al., 2024). In conclusione, nonostante il timore diffuso che l'intelligenza artificiale possa avere un impatto negativo in ambito lavorativo, evidenze recenti mostrano un quadro più articolato: se integrata con visione strategica e responsabilità sociale, l'AI non solo non minaccia l'occupazione, ma può diventare una leva per creare lavoro più qualificato, resiliente e centrato sulle competenze umane (Chatterjee et al., 2024).

## **2.2 AI e commercio internazionale: prospettive e criticità**

### **2.2.1 L'AI nell'export: ottimizzazione dei processi e riduzione dei costi**

Nel contesto di un mercato globale che sta diventando sempre più complesso, l'intelligenza artificiale si sta affermando come uno strumento chiave per rendere l'export più efficiente, rapido e sostenibile. In particolar modo, l'implementazione dell'AI può sopperire alla sistematica necessità delle imprese di ridurre i costi operativi e rispondere con maggiore precisione alle dinamiche della domanda internazionale (WTO, 2024; Ozturk, 2024).

Il primo aspetto da analizzare riguarda l'ottimizzazione della logistica e dei processi doganali: l'intelligenza artificiale permette di facilitare il monitoraggio ed il tracciamento in tempo reale delle spedizioni, in modo da ottenere una maggiore visibilità ed efficienza e una riduzione dei ritardi (WTO, 2024). L'utilizzo di "magazzini intelligenti" permette una migliore gestione delle scorte e delle spedizioni globali, ottimizzando il coordinamento delle attività e le previsioni (OECD, 2022). Anche per quanto riguarda i processi doganali, uno studio di Cao e Zheng (2024) circa l'implementazione di sistemi di ispezione automatizzata in Cina, ha dimostrato che è possibile ridurre i tempi di sdoganamento, aumentare l'efficienza e la sicurezza e, allo stesso tempo, ridurre i controlli manuali. Inoltre, i sistemi di traduzione linguistica basati sull'intelligenza artificiale sono in grado di fornire servizi di traduzione in tempo reale, facilitando le comunicazioni e, di conseguenza, assicurando transazioni e negoziazioni più proficue.

In ambito strategico, data la capacità dei sistemi di AI di elaborare grandi quantità di dati provenienti dai social media, dalle recensioni online e dalle valutazioni dei consumatori, essi possono essere impiegati per adattare prodotti, servizi e strategie di marketing per allinearsi alle culture locali e alle aspettative dei consumatori (Chishty et al., 2025). Infine, l'AI supporta anche sistemi di pricing dinamico, permettendo alle imprese di adattare in tempo reale i prezzi in base alla domanda locale e alla concorrenza, migliorando la competitività sui mercati esteri (Chenavaz & Dimitrov, 2025).

### **2.2.2 Rischi legati all'adozione dell'AI nel commercio globale**

La principale preoccupazione circa l'implementazione dell'intelligenza artificiale è che i benefici da essa derivante non siano equamente distribuiti. Secondo le stime presentate dal Fondo Monetario Internazionale (2025) illustrano che le economie avanzate (AEs), data la loro maggiore preparazione all'AI, la maggiore esposizione tecnologica e il miglior accesso alle infrastrutture high-tech e ai dati, beneficiando di oltre il doppio dell'impatto sul PIL rispetto ai paesi a basso reddito. Similmente, uno studio dell'OCSE (2025) dimostra che le grandi imprese (oltre 250 dipendenti) adotterebbero l'AI tre volte di più rispetto alle piccole (39% vs 12% nella media OCSE). Tali evidenze generano non poca preoccupazione poiché la frammentazione nella diffusione dell'AI e la velocità con cui è stata implementata potrebbe rappresentare una minaccia per la competitività e la coesione in quanto i *first mover*<sup>2</sup> otterrebbero sempre maggiori vantaggi e i costi per abbandonare le tecnologie obsolete diventerebbero sempre più elevati (OCSE, 2025). Un'altra criticità riguarda la bassa qualità dei dati utilizzati per l'addestramento dei modelli di intelligenza artificiale: essi possono generare algoritmi distorti portando, di conseguenza, a risultati imprecisi e dannosi nelle previsioni e nei processi decisionali. Ciò senza considerare il fatto che i dati potrebbero anche essere manomessi o sabotati (OCSE, 2025).

Da ultimo, è importante rilevare che la concentrazione di una quota significativa degli investimenti globali in AI da parte di un numero ristretto di attori può generare

---

<sup>2</sup> In economia un first mover è un'azienda che per prima entra in un nuovo mercato o introduce un nuovo prodotto o tecnologia.

vulnerabilità sistemiche lungo le catene del valore, poiché un'interruzione o una limitazione imposta da uno di questi provider potrebbe compromettere l'intero sistema commerciale globale (Trade Finance Global, 2024).

### **2.2.3 Regolamentazione ed implicazioni etiche dell'AI nei mercati internazionali**

Per quanto riguarda l'aspetto normativo, le implicazioni legali dell'AI nel commercio globale presentano una complessa combinazione di sfide ed opportunità. Un primo aspetto da considerare è l'adeguatezza delle normative commerciali esistenti: le attuali regolamentazioni internazionali sul commercio, infatti, non sono state concepite pensando all'intelligenza artificiale. Pertanto, esse si concentrano principalmente su questioni commerciali tradizionali, come dazi, contingenti e barriere tariffarie, senza affrontare le caratteristiche e le esigenze specifiche dell'AI (Durrant, 2024). Il primo tentativo rilevante circa la regolamentazione dell'AI a livello internazionale è stato intrapreso nel 2019 dall'OCSE, la quale ha approvato le linee guida relative ai Principi sull'intelligenza artificiale, successivamente riconosciuti anche dal G20. Successivamente, nel marzo 2024, il Parlamento Europeo, su proposta della Commissione Europea, ha adottato *l'AI Act* (legge sull'AI): il primo regolamento sovranazionale sull'intelligenza artificiale (OCSE, 2024). Esso trova applicazione presso tutti i settori, ad eccezione di quello militare, e ha come obiettivo quello di creare un quadro giuridico comune circa lo sviluppo, la commercializzazione e l'utilizzo dei sistemi di intelligenza artificiale, garantendo al contempo la tutela dei diritti fondamentali, della salute e della sicurezza (Parlamento europeo e Consiglio dell'Unione europea, 2024). Il regolamento stabilisce le regole da applicarsi ai sistemi di AI in base a quattro livelli di rischio: rischio minimo o nullo, rischio limitato, rischio elevato e rischio inaccettabile (Commissione Europea, 2024). Oltre all'OCSE e all'Unione Europea, anche altre istituzioni internazionali stanno contribuendo a definire un quadro normativo complesso riguardante l'adozione dell'AI: l'Unesco, ad esempio, ha adottato nel 2021 la "Raccomandazione globale dell'Unesco sull'etica dell'AI", ovvero uno strumento di soft law che ha come fulcro principale la protezione dei diritti e della dignità umana (UNESCO, 2021).

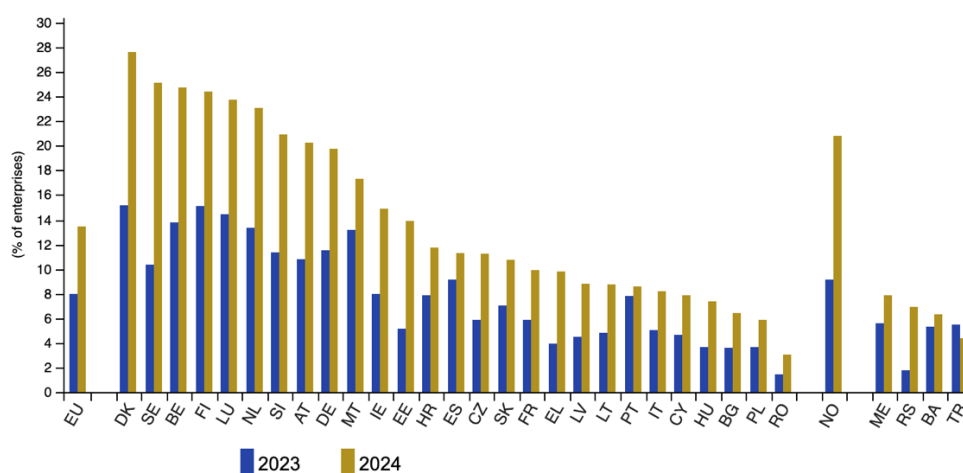
Dal punto di vista etico, il rapido processo di evoluzione dell'AI crea continuamente nuove sfide: questioni come la responsabilità algoritmica, la tutela della privacy dei dati e la trasparenza nei processi decisionali richiedono un approccio collaborativo e proattivo in modo da favorire l'efficienza e la cooperazione internazionale (Durrant, 2024). In particolare, quando le decisioni strategiche vengono delegate a sistemi automatizzati, possono sorgere lacune di responsabilità ed opacità. In particolar modo, garantire la privacy e la protezione dei dati è cruciale: i sistemi di intelligenza artificiale si basano sull'elaborazione di enormi quantità di informazioni sensibili (Durrant, 2024). Il problema si accentua ulteriormente nei contesti di sicurezza e controllo dei confini. Gli strumenti di Intelligenza Artificiale, infatti, vengono impiegati frequentemente per svolgere attività quali il controllo doganale, il tracciamento logistico e il mantenimento della sicurezza alle frontiere: questo utilizzo può generare confusione in merito alla distinzione tra monitoraggio legittimo e sorveglianza invasiva (Just Security, 2024).

## **2.3 Evidenze empiriche sull'uso dell'AI nelle imprese europee**

### **2.3.1 Settori maggiormente coinvolti**

In Europa, stando a quanto è emerso dalle statistiche ufficiali Eurostat per il 2024, il 13,48% delle imprese europee con più di dieci impiegati utilizzava l'intelligenza artificiale, con un aumento percentuale di circa l'8% rispetto all'anno precedente (Figura 1).

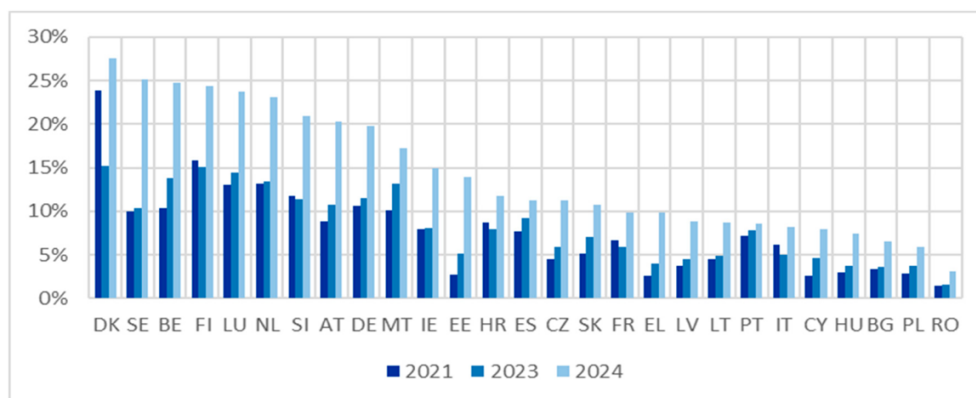
Figura 1 - Imprese che utilizzano tecnologie di intelligenza artificiale, 2023 e 2024.



Fonte: Eurostat (2024)

I paesi europei con il maggior numero di imprese che utilizzano l'AI sono: la Danimarca (27,58%), la Svezia (25,09%) ed il Belgio (24,71%); mentre quelli con il minore tasso di utilizzo sono la Romania (3,07%), la Polonia (5,9%) e la Bulgaria (6,47%).

Figura 2 - Tasso complessivo di adozione dell'IA da parte delle imprese con 10 o più dipendenti nei paesi dell'UE – anni 2021, 2023, 2024.

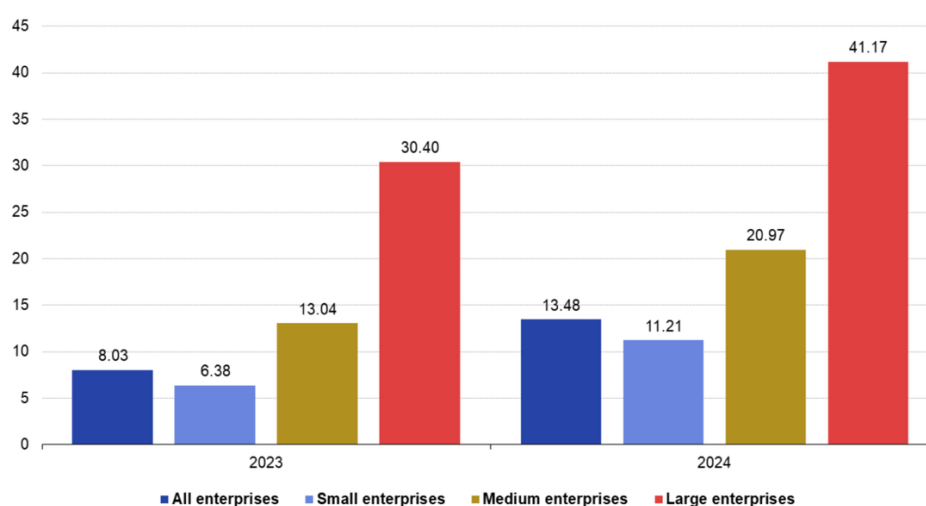


Fonte: Eurostat (2024)

A livello dimensionale, i dati Eurostat evidenziano che le imprese di grandi dimensioni utilizzano l'AI in misura maggiore rispetto alle piccole e medie imprese: nel 2024, il 41,17% delle imprese di grandi dimensioni ha utilizzato l'AI, contro il 20,97% delle imprese medie e il 11,21% delle imprese di piccole dimensioni (Figura 2). Anche uno studio dell'OECD, condotto nel 2025, afferma che circa il 39% delle grandi imprese OECD utilizza l'AI (di cui il 70% in Finlandia) contro il 12% delle piccole imprese. Il dato è confermato anche da un'indagine condotta dalla Banca Centrale Europea nel 2024:

circa il 75% delle grandi imprese dell'area euro utilizza almeno una tecnologia di intelligenza artificiale nelle attività quotidiane (Bergeaud et al., 2025). Tale differenza può essere spiegata dalla complessità per le imprese di piccole dimensioni di integrare al loro interno tecnologie basate sull'AI, così come anche dalla possibilità da parte delle imprese di grandi dimensioni di beneficiare maggiormente dei vantaggi derivanti dalla sua implementazione, sia in termini di riduzione dei costi sia di incremento delle economie di scala (Commissione Europea, 2024).

Figura 3 - Imprese che utilizzano tecnologie di intelligenza artificiale per classe dimensionale, UE, 2023 e 2024



Fonte: Eurostat (2024)

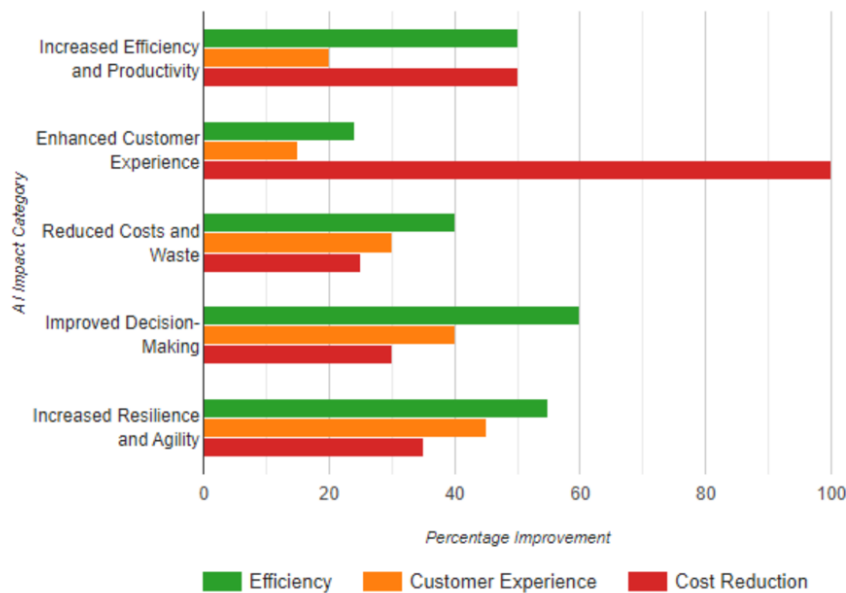
Per quanto riguarda i settori maggiormente interessati da questa trasformazione digitale, i dati Eurostat (2024) mostrano che l'adozione è molto più alta nei servizi ad alta intensità di conoscenza: infatti, in cima vi è il settore dell'informazione e della comunicazione (ITC) (48,7%), seguito dai servizi professionali, scientifici e tecnici (30,5%). La manifattura si colloca su livelli intermedi con circa il 10-15% delle imprese, a seconda dell'ambito di azione, mentre i settori delle costruzioni e alloggio/ristorazione risultano essere quelli meno coinvolti, con un tasso di circa il 6%. Infine, secondo un'analisi del Fondo Monetario Internazionale (2025), i tassi di adozione dell'AI risultano particolarmente elevati nei comparti ICT, finanziario, dei servizi professionali e manifatturiero: in questi settori, infatti, l'introduzione di sistemi intelligenti è associata a incrementi di produttività compresi tra il 5% e il 10%.

### 2.3.2 Studi recenti sul tema nelle aziende esportatrici

Un aspetto rilevante da analizzare ai fini di questo studio riguarda la connessione tra il grado di specializzazione dei sistemi intelligenti e l'apporto che questi possono fornire all'interno di un'impresa esportatrice. Infatti, uno studio recente ha evidenziato che l'adozione mirata dell'intelligenza artificiale può agire come leva strategica per la diversificazione economica, facilitando l'emergere di nuove traiettorie produttive ad alto contenuto tecnologico e contribuendo così alla trasformazione strutturale delle economie (Mishra et al., 2023). In particolare, utilizzando un database su investimenti privati in 29 categorie di IA (es. robotica, *agri-tech*, *fintech*, visione artificiale, veicoli autonomi, ecc.) incrociato con i dati di specializzazione export per circa 80 paesi, è stato possibile osservare che ciascun tipo di tecnologia ha un legame maggiore con alcuni settori piuttosto che con altri: ad esempio, l'AI per la robotica e automazione è fortemente connessa ai settori manifatturieri tradizionali (macchinari, metallurgia, prodotti chimici, caldaie), mentre i sistemi di visione artificiale sono maggiormente affini ai settori dell'agroalimentare e dell'e-commerce (Mishra et al., 2023).

In merito all'implementazione dell'AI nella supply chain, e quindi nei processi propri delle aziende manifatturiere ed esportatrici, uno studio condotto da Kumar (2023) su un campione di 350 aziende evidenzia che le principali aree di impatto riguardano: l'*efficiency*, con incrementi superiori al 50%; la *customer experience*, che può beneficiare fino a un +90% in termini di reattività e personalizzazione; e la *cost reduction*, che si attesta tra il 30% e il 50% a seconda dei processi considerati. Il grafico riportato (Figura 4) illustra, infatti, i margini di miglioramento promossi dall'AI e l'impatto che questa ha sulla supply chain, rendendola non solo più performante, ma anche più resiliente alle variazioni del contesto esterno.

Figura 4 – Impatto dell'adozione dell'AI nella gestione della catena di approvvigionamento



Fonte: Kumar, A. (2023).

Inoltre, studi di McKinsey & Company hanno dimostrato che l'adozione di sistemi basati sull'AI può sia ridurre gli errori nella supply chain dal 20% al 50%, contribuendo a diminuire fino al 65% gli ordini di prodotti persi; ma anche ridurre i costi logistici del 15%, quelli di inventario del 35% e aumentare il livello dei servizi del 65% (McKinsey & Company, 2021).

Dal lato dei processi di esportazione, un'analisi empirica condotta da Barbosa (2024) su un campione di oltre 30.000 imprese portoghesi attive tra il 2014 e il 2020 mostra che circa il 12% ha adottato almeno una tecnologia basata sull'intelligenza artificiale.

Questo dato risulta significativo in quanto è stato possibile osservare che un elevato grado di apertura e sofisticazione rispetto all'AI e alle tecnologie dell'Industria 4.0 rafforza la posizione dell'impresa nei mercati internazionali rispetto ai concorrenti, aumentando quindi la probabilità di esportare. Similmente, uno studio di Chishty et al. (2024), basato su un'indagine svolta su 449 multinazionali indiane operanti in diversi settori, ha confermato che le imprese che utilizzano l'AI per ottimizzare la supply chain, analizzare dati di mercato e personalizzare le strategie commerciali registrano un incremento delle vendite estere per dipendente, dimostrando una maggiore resilienza e adattabilità nei mercati internazionali. Tuttavia, affinché si possa beneficiare di tali vantaggi, è importante sottolineare che le imprese debbano disporre di infrastrutture digitali avanzate e risorse umane qualificate (Barbosa, 2024); inoltre, come osservano Ionaşcu et al. (2024), per massimizzare i benefici complessivi è essenziale integrare

diverse tecnologie digitali e favorire una distribuzione più equa tra i vari settori e le diverse classi dimensionali, soprattutto nell'ottica dell'internazionalizzazione.

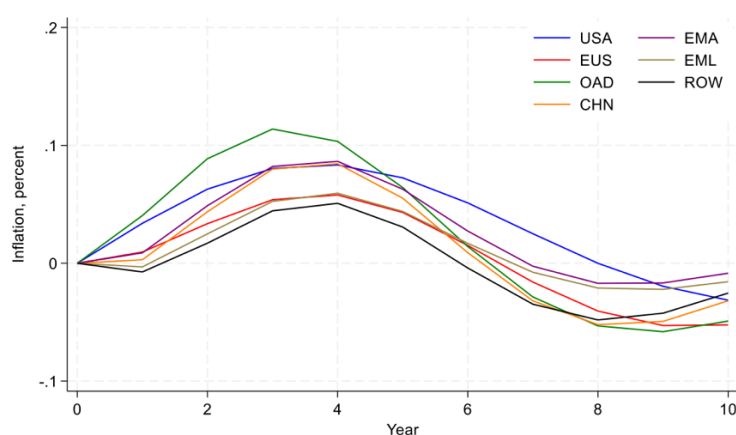
### **2.3.3 Prospettive future e scenari di sviluppo**

Nel tracciare i futuri scenari relativi all'intelligenza artificiale, è opportuno iniziare da uno degli aspetti più dibattuti in letteratura: il suo potenziale impatto sulla produttività. Considerando uno scenario realistico di adozione, uno studio del Fondo Monetario Internazionale (FMI, 2025) presuppone che in Europa, nei prossimi 5 anni, si verificherà un aumento medio di circa l'1,1% della produttività totale dei fattori (TFP), valore che risulta superiore del 60% rispetto alle stime relative agli Stati Uniti (0,7%). Questo produce inevitabilmente un effetto positivo sul PIL, il quale si prospetta in crescita fino al 4% entro il prossimo decennio grazie all'adozione dell'intelligenza artificiale (Cerutti et al., 2025). Inoltre, secondo McKinsey (2023), l'adozione diffusa dell'AI generativa potrebbe provocare un impatto economico annuo tra i 2.600 e i 4.400 miliardi di dollari a livello globale, grazie alla sua implementazione in una vasta gamma di attività cognitive, dalla produzione di testi fino al supporto clienti. A livello di produttività, questo si tradurrebbe in un'accelerazione compresa tra lo 0,1% e lo 0,6% annuo fino al 2040. Tuttavia, coerentemente con quanto detto in precedenza, tali benefici saranno maggiormente concentrati nei paesi ad alto reddito ed avanzati (come, ad esempio, Lussemburgo o Germania in Europa e Stati Uniti) e minori in economie come Romania o Bulgaria. I paesi a basso reddito, infatti, rischiano di essere esclusi dai vantaggi derivanti dall'automazione e dalla trasformazione digitale a causa sia della presenza di settori più ridotti, sia per le loro politiche salariali che non favoriscono l'adozione dell'AI (Misch et al., 2025; Cerutti et al., 2025).

In relazione all'aspetto inflazionistico, il Fondo Monetario Internazionale ha osservato che nel breve periodo gli shock positivi di produttività legati all'IA possono determinare un lieve aumento dell'inflazione, causato dalla crescita della domanda aggregata spinta dai maggiori redditi attesi. Tuttavia, nel medio-lungo periodo, la maggiore capacità di offerta, sostenuta dalla crescita della produttività e dall'accumulazione di capitale, riuscirà a compensare le pressioni inflazionistiche iniziali, conducendo a una dinamica disinflazionistica. Questa dinamica è efficacemente descritta dal seguente grafico

(Figura 5), il quale mostra l'andamento dell'inflazione (in percentuale) nell'arco di 10 anni in uno scenario di alta crescita della produttività totale dei fattori (TFP) a seguito dell'adozione dell'intelligenza artificiale. Nel primo periodo (3-4 anni) tutti i paesi sperimentano un aumento moderato dell'inflazione, con un picco che si aggira attorno al +0,1-0,15%. Dal quinto anno in poi l'inflazione comincia a declinare gradualmente fino ad arrivare al decimo anno in cui l'inflazione è prossima allo zero o leggermente negativa.

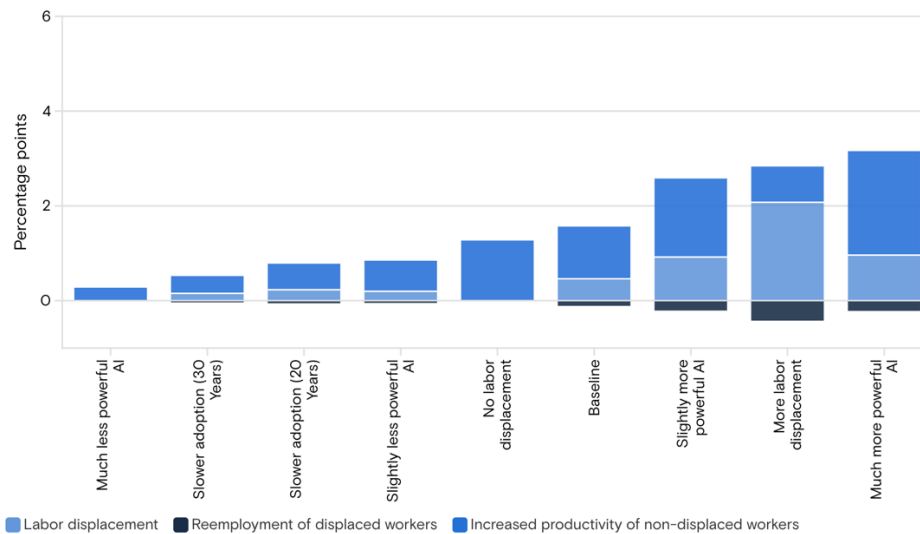
Figura 5 - Inflazione negli scenari di base con alta crescita della produttività totale dei fattori (TFP)



Fonte: Fondo Monetario Internazionale (2025)

Un altro aspetto da analizzare riguarda le possibili ripercussioni future dell'implementazione dell'intelligenza artificiale in ambito lavorativo. Si stima, infatti, che l'AI generativa può automatizzare fino al 60–70% del tempo impiegato dai lavoratori in numerosi compiti lavorativi, soprattutto cognitivi, il che comporterebbe un aumento della produttività del lavoro pari allo 0,1-0,6% all'anno fino al 2040 (McKinsey, 2023). Quindi, questo significa che nei prossimi dieci anni fino a 300 milioni di posti di lavoro a tempo pieno a livello globale potrebbero essere automatizzati o profondamente trasformati (Figura 6), in particolare nei settori dell'amministrazione, della contabilità, della consulenza e della programmazione (Goldman Sachs, 2023).

Figura 6 - Effetto dell'adozione dell'IA sulla crescita annua della produttività del lavoro, in un periodo di adozione di 10 anni.



Fonte: Centro Studi di Goldman Sachs (2023)

Infine, con riguardo alle dinamiche dei processi interni alle aziende, alcune ricerche recenti evidenziano quelli che saranno i risvolti attesi negli anni avvenire. Si prospetta che il mercato globale dell'AI applicata alla supply chain subirà una fortissima espansione: secondo il Global Trade Magazine, la crescita sarà da 4,5 miliardi di dollari nel 2023 a circa 157,6 miliardi di dollari entro il 2033, con un tasso di crescita annuale composto (CAGR) del 42,7% durante questo periodo (Global Trade Magazine, 2023).

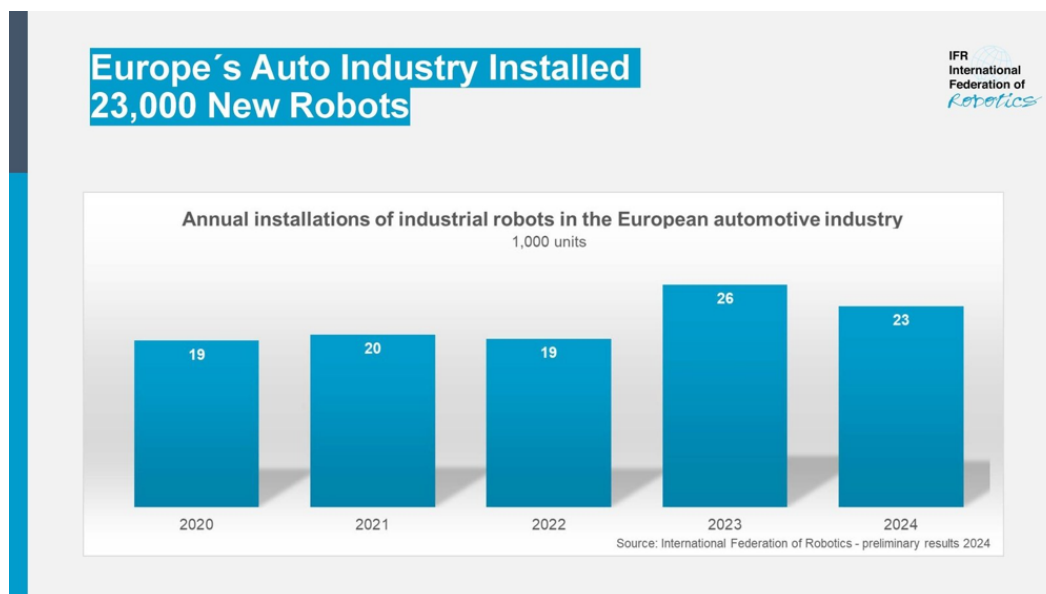
## Capitolo 3 – Caso Studio: L’AI nell’Industria Automobilistica

### 3.1 Scelta del caso studio e metodologia di analisi

#### 3.1.1 Motivi della selezione del settore automobilistico

L’industria automobilistica costituisce da tempo uno dei pilastri fondamentali dell’industria europea. Essa contribuisce in maniera significativa sia alla crescita del PIL (l’industria automobilistica europea genera circa €1.000 miliardo di PIL, pari all’8,2%) sia in termini di occupazione (offre circa 13 milioni di posti di lavoro, diretti e indiretti) (cfr. Commissione Europea, 2025; European Automobile Manufacturers’ Association, 2020). Nel 2023, secondo uno studio di McKinsey & Company (2024), l’industria automobilistica europea ha generato circa €1,7 trilioni di valore aggiunto lordo (GVA) per l’economia europea, mostrando un chiaro impatto sul piano delle esportazioni: circa €570 miliardi, infatti, sono derivanti dall’export di tecnologie e veicoli (su 13 milioni di autovetture prodotte, 4 milioni sono destinate ai mercati esteri). Pertanto, ogni euro investito dal settore auto europeo produce circa €2,6 di valore aggiunto per l’economia dell’EU (McKinsey & Company, 2024). L’andamento positivo del comparto può essere ricondotto anche al fatto che il settore automobilistico è stato fra i primi ad introdurre nelle fabbriche sistemi di automazione e robotica. Nel 2024, sono stati installati 23.000 robot industriali in Europa, costituendo il secondo miglior risultato negli ultimi cinque anni (Figura 7). Inoltre, sei paesi europei figurano tra i primi dieci paesi al mondo con la maggiore densità di robot per l’industria automobilistica tra il 2023 e il 2024: la Svizzera si presenta al primo posto con un rapporto di 3.876 robot per 10.000 operai (International Federation of Robotics, 2024).

Figura 7 - Installazioni annuali di robot industriali nell’industria automobilistica europea (in migliaia di unità)



Fonte: International Federation of Robotics (2024)

Attualmente il settore auto europeo sta attraversando un profondo cambiamento strutturale dovuto in parte a nuovi interventi normativi più stringenti in ambito ambientale (come, ad esempio, il pacchetto *Fit For 55*<sup>3</sup> e gli standard Euro sulle emissioni) i quali impongono alle case automobilistiche di produrre veicoli a basse e zero emissioni (Business Wire, 2025; Commissione Europea, 2025) e in parte al maggior interesse sviluppato nei confronti dei veicoli elettrici: nel 2024, una su cinque macchine vendute era elettrica, con un aumento medio delle vendite su base annua di oltre il 50% dal 2020 al 2023 (Commissione Europea, 2025; McKinsey & Company, 2024). Uno studio recente di McKinsey & Company (2024) stima che la mobilità elettrica potrebbe aggiungere dai 240 ai 300 miliardi di dollari al valore aggiunto lordo (VAL) europeo in servizi di assistenza e post-vendita, raggiungendo una quota compresa tra il 30% e il 42% sulle vendite globali.

Un altro aspetto da considerare è l'impegno in innovazione: le industrie automobilistiche europee investono circa €60 miliardi l'anno in innovazione e sviluppo, costituendo circa il 33% di tutta la spesa privata in R&S dell'UE (McKinsey & Company, 2024; European Automobile Manufacturers' Association, 2020). In ambito

<sup>3</sup> Pacchetto di riforme e regolamenti economici e sociali presentato dalla Commissione Europea nel 2021 volto a contrastare il cambiamento climatico e ridurre le emissioni di gas serra.

operativo, esso si concretizza in maggiori investimenti in AI, software e digitalizzazione in grado di interessare tutte le varie fasi del processo industriale.

In ambito produttivo, grazie all'intelligenza artificiale predittiva le aziende sono in grado di monitorare i dati sulle prestazioni dei robot per identificare lo stato futuro delle apparecchiature: ciò consentirebbe di risparmiare fino 1,3 milioni di dollari l'ora sui costi di fermo di ciascun veicolo (International Federation of Robotics, 2024). Anche l'utilizzo di robot collaborativi (cobot) è un trend in crescita: questi sono dotati di sensori, videocamere e visione artificiale in grado di rispondere in tempo reale ai cambiamenti dell'ambiente, in modo da affiancare i lavoratori e svolgere compiti che richiedono altissima precisione (come il controllo qualità) oppure che potrebbero essere pericolosi (International Federation of Robotics, 2024). Le case produttrici di autoveicoli, inoltre, utilizzano gemelli digitali (digital twin) per ottimizzare le prestazioni di un sistema fisico creandone una replica virtuale: ciò permette di effettuare simulazioni e prevedere i possibili risultati, risparmiando così sui costi (International Federation of Robotics, 2024). Dal lato della logistica e delle supply chain, invece, il settore automotive si trova spesso ad operare con catene del valore globali, piuttosto complesse, e quindi soggette a rischi come disastri naturali, pandemie, guerre commerciali o carenze di componenti. Per fronteggiare tale situazione, l'utilizzo dell'AI consente di ottimizzare la gestione dei fornitori e delle scorte, analizzando tramite algoritmi di *machine learning* dati di domanda, trasporti, inventari e perfino dati geopolitici/meteo, allo scopo di intervenire anticipatamente e ridurre stock in eccesso e *stockout* (Automotive Logistics, 2024). Secondo l'European Automobile Manufacturers' Association (2020), l'AI applicata all'intera catena del valore contribuirà ad aumentare la produttività, la sicurezza dei prodotti e l'obiettività (attenuando i pregiudizi umani). In aggiunta, una gestione logistica più intelligente e reattiva oltre ad avere un impatto in termini di incremento dell'efficienza, ottimizzazione dei flussi e riduzione dei costi, incide anche su emissioni, consumo energetico e uso di risorse, rendendosi coerente con gli obiettivi europei di sostenibilità ambientale (European Automobile Manufacturers' Association, 2020). La pandemia di Covid-19 e le tensioni geopolitiche hanno messo a dura prova le catene del valore globali, evidenziando la necessità di riorganizzarle in chiave più resiliente per ridurre la dipendenza dalle importazioni e mantenere la leadership tecnologica dell'Europa

(Business Wire, 2025). In particolar modo, secondo un rapporto ISG, sempre più aziende stanno internalizzando la produzione di batterie (Business Wire, 2025) e, allo stesso tempo, diversificando i propri fornitori (World Economic Forum, 2021). Infine, nelle fasi a valle della catena del valore, l'intelligenza artificiale è utilizzata soprattutto nell'ambito dell'e-commerce e della profilazione del cliente: sulla base di una modesta quantità di dati, l'apprendimento automatico è in grado di identificare diversi modelli di input e ad assegnare a ciascuno di questi un tipo di conducente, prediligendo campagne personalizzate. Maggiore è la precisione dell'algoritmo, maggiori saranno i vantaggi fiscali e funzionali per il venditore e minore sarà lo sforzo per il cliente (Automotive World, 2023). Nelle vendite, chatbot e assistenti virtuali (basati su NLP) migliorano il servizio clienti rispondendo a domande tecniche dei guidatori direttamente dall'infotainment dell'auto (Automotive World, 2023). In conclusione, il settore automotive rappresenta un caso emblematico per analizzare l'implementazione dell'AI in ambito industriale principalmente per il suo ruolo cruciale a livello sistemico: esso incide in maniera preponderante in termini di occupazione, esportazioni e innovazione tecnologica, e ogni cambiamento che avviene al suo interno ha ripercussioni dirette su settori collegati come la metallurgia, l'elettronica, la logistica e i servizi digitali. La complessità della filiera produttiva, l'elevato grado di automazione e la recente sfida data dall'elettrico lo rendono un ambiente ideale per testare la capacità dell'IA di ottimizzare produzione, logistica e personalizzazione in tempo reale.

L'analisi presentata in questo capitolo utilizza un approccio qualitativo-descrittivo, con l'obiettivo di evidenziare come l'intelligenza artificiale stia rivoluzionando il settore. La scelta delle fonti è ricaduta su studi scientifici valutati da esperti, rapporti tecnici di istituzioni europee (ad esempio, ACEA, 2020; International Federation of Robotics, 2024), analisi di centri di ricerca e società di consulenza (McKinsey & Company, 2024a; 2024b), oltre a esempi pratici di aziende leader nel campo. In particolare, è stata posta attenzione al BMW Group, preso come caso di studio, che rappresenta un esempio significativo di applicazione su larga scala dell'IA nel settore auto europeo. Sono state preferite le fonti più affidabili e recenti – soprattutto pubblicazioni uscite tra il 2020 e il 2025 – pertinenti al contesto europeo e poi integrate con la documentazione

prodotta dal BMW Group sul tema. Inoltre, particolare attenzione è stata posta alle esperienze concrete del gruppo riguardanti l'adozione dell'IA lungo la catena del valore, valutando come questa ha influenzato la produttività e le vendite all'estero, e l'impatto dell'AI in processi come la ricerca e sviluppo, la logistica e il controllo qualità. Questo metodo è utile per capire non solo quali risvolti concreti ha apportato l'implementazione dell'intelligenza artificiale nell'industria automobilistica, ma anche le ragioni che spingono le imprese a adottarla, le sfide che incontrano e gli elementi essenziali per una sua reale efficacia. Sulla base di questo, nei paragrafi successivi sarà presentato in modo approfondito il caso del BMW Group. L'obiettivo è cercare di capire in che modo l'AI sia stata effettivamente messa in pratica all'interno delle attività produttive e quale impatto abbia avuto in termini di produzione, gestione della logistica e strategia.

## **3.2 L'implementazione dell'AI in un'azienda automobilistica esportatrice**

Al fine di fornire un esempio concreto di come l'intelligenza artificiale opera nel contesto industriale del settore auto, in questa sezione verrà presentata l'azienda selezionata per lo studio: il Gruppo BMW.

### **3.2.1 Presentazione dell'azienda e contesto operativo**

Il Bmw Group è uno dei principali leader mondiali nel settore di auto e motociclette per il segmento premium e luxury, nonché casa madre dei marchi BMW, MINI, Rolls-Royce e BMW Motorrad (BMW Group, 2025). Inoltre, esso dispone anche di un'ampia offerta di soluzioni di mobilità con la sussidiaria Alphabet Fleet Management, di gestione finanziaria e leasing con BMW Group Financial Services e di design con la compagnia creativa BMW Designworks (BMW Group, 2025). Il Gruppo è organizzato in tre segmenti operativi:

1. Automotive, il quale produce i veicoli targati BMW, MINI e Rolls-Royce. Esso include nel proprio portfolio diverse categorie di automobili, a partire dalla *premium*

*compact class* fino ad arrivare alla *ultra-luxury class*. In questo segmento rientrano anche i veicoli ibridi e quelli completamente elettrici (BMW Group, 2021). Nel 2024 il segmento Automotive ha registrato un margine EBIT del 6,3 %, collocandosi all'interno della fascia obiettivo annuale del 6–7 %, ma al di sotto del target strategico di lungo periodo dell'8–10 %. Le vendite complessive di veicoli BMW, MINI e Rolls-Royce si sono attestate a circa 2,45 milioni di unità, con un calo del 4 % rispetto al 2023, mentre i ricavi trimestrali del segmento hanno evidenziato, nel primo trimestre 2025, una contrazione del 5,6 % su base annua, passando da 30.939 milioni di euro a 29.211 milioni di euro (BMW Group, 2024).

2. Motorcycles, il segmento che si occupa della produzione di motociclette. Esso si concentra principalmente sul settore premium, offrendo una vasta gamma di modelli in diverse categorie di mobilità, tra cui Sport, Tour, Heritage, Adventure e Urban (BMW Group, 2021). Nel 2024, secondo il comunicato ufficiale BMW Motorrad del 17 gennaio 2025, ha raggiunto suo miglior risultato di sempre con 210 408 motociclette vendute a livello mondiale (di queste 118.727 vendute in Europa).
3. Financial Services. Il Gruppo Bmw offre servizi finanziari in più di 50 paesi in tutto il mondo, tramite società proprie e accordi di cooperazione con fornitori locali di servizi finanziari e importatori (BMW Group, 2021). L'attività principale comprende il credito al consumo e il leasing di automobili e motociclette dei marchi del BMW Group ai clienti al dettaglio, oltre che a numerosi prodotti assicurativi e bancari (BMW Group, 2021). Nel 2024, il segmento Financial Services ha conseguito un ROE pari all'15,1%, ribadendo la propria solidità, ed ha registrato un aumento significativo delle nuove sottoscrizioni di contratti finanziari (BMW Group, 2024; BMW US Capital LLC, 2025).

L'azienda capogruppo della società è Bayerische Motoren Werke AG (BMW AG) con sede a Monaco di Baviera, che controlla direttamente o indirettamente tutte le società del gruppo e ne coordina la strategia globale (BMW Group, 2021). Nel 2022, BMW ha acquisito la quota di maggioranza della joint venture BMW Brilliance Automotive in Cina, apportando un notevole cambiamento nella sua struttura (BMW Group, 2021). Il BMW Group si compone al 31 dicembre 2024 di 31 stabilimenti in 15 paesi, con circa 159 000 dipendenti (in aumento del 2,63% rispetto al 2023) (BMW Group, 2024). I principali stabilimenti si trovano in Germania, negli Stati Uniti ed in Cina.

BMW opera su scala globale, con una presenza consolidata in Europa, nelle Americhe e in Asia. A livello di singoli paesi, i dati del BMW Group Report 2024 confermano la Cina come primo mercato di riferimento del gruppo, con circa un terzo delle vendite globali nel 2024, seguita dalla Germania e dagli Stati Uniti (BMW Group, 2024). Infine, per quanto riguarda la strategia, per BMW “*il futuro è digitale, elettrico e sostenibile*”: in virtù di questo, la società sta sistematicamente rendendo elettrico il suo intero portfolio, stimando che entro il 2030 il 50% delle vendite globali BMW sarà costituito da veicoli 100% elettrici (BMW Group, 2022). Contestualmente, ha imposto come obiettivo la riduzione del 40% delle emissioni di CO<sub>2</sub> per veicolo lungo l'intero ciclo di vita entro il 2030 (rispetto ai livelli del 2019) (BMW Group, 2022), perseguendo al contempo la neutralità climatica dell'azienda entro il 2050 (BMW Group, 2022). Inoltre, grazie al progetto BMW iFACTORY - basato sui tre pilastri della produzione: *lean* (snella ed efficiente), *green* (sostenibile) e *digital* (digitalizzata) – da realizzare entro il 2030, sarà possibile rendere le fabbriche BMW più flessibili e competitive e, come spiega Milan Nedeljković (membro del consiglio di amministrazione di BMW AG per la produzione), «promuovere la digitalizzazione portando la coerenza dei dati a un livello completamente nuovo lungo l'intera catena del valore e in ciascuna delle nostre catene di processo» (BMW Group, 2022).

### **3.2.2 Soluzioni AI adottate: dalla produzione alla logistica**

Considerando il periodo compreso tra il 2021 e il 2024, BMW Group ha intensificato notevolmente l'adozione di strumenti di intelligenza artificiale: l'AI è considerata più che una semplice innovazione tecnologica, ma come un elemento chiave per favorire la trasformazione digitale e per migliorare l'efficienza, la qualità e l'esperienza del cliente (BMW Group, n.d.). Già a partire dal 2018, infatti, l'azienda ha implementato sistemi di AI nell'ambito della produzione in serie: algoritmi di visione artificiale, ad esempio, sono utilizzati per riconoscimento automatico delle immagini, rendendo possibile in millisecondi il confronto tra le foto dei componenti montati con modelli standard (BMW Group, 2019). Questo consente di ridurre gli errori e di controllare se tutte le componenti sono state montate e se sono state montate nel posto giusto (BMW Group,

2019). Un altro esempio di sistema efficiente per il controllo qualità in fase di assemblaggio è dato dallo stabilimento di Dingolfing, in Germania, dove un'applicazione AI distingue le vere micro-crepe sulle lamiere da semplici residui di polvere o olio, evitando inutili scarti o rilavorazioni e riducendo il numero degli pseudo-difetti rilevati (BMW Group, 2019). Infine, nel 2024, BMW ha avviato il progetto pilota "GenAI4Q" presso lo stabilimento di Regensburg, sviluppando un sistema AI per il controllo qualità in fase di assemblaggio finale (BMW Group, 2025). Ogni 57 secondi viene prodotto un nuovo veicolo (circa 1400 al giorno): di questi, nessuno è uguale all'altro (BMW Group, 2025). Il sistema permette di costruire ciascun veicolo secondo le specifiche individuali dei clienti per il mercato globale, analizzando in pochi istanti una mole di dati eterogenei (caratteristiche del veicolo, informazioni di produzione in tempo reale, risultati di test precedenti) e determinando automaticamente quali controlli effettuare e in quale ordine (BMW Group, 2025). Un altro tema riguarda l'utilizzo della visione artificiale, quindi di telecamere intelligenti, per controllare in maniera automatica la verniciatura delle scocche. Nello stabilimento di Regensburg, apposite telecamere scansionano ogni carrozzeria alla ricerca di difetti di verniciatura o impurità, confrontando le immagini con standard di riferimento. Eventuali imperfezioni rilevate vengono poi corrette in automatico da robot di rilavorazione, senza intervento umano (BMW Group, 2023). Analogamente, nello stampaggio a caldo delle scocche motore, BMW ha introdotto sistemi di visione AI per identificare micro-difetti sulle parti metalliche difficilmente visibili a occhio nudo, migliorando la qualità senza rallentare la produzione (BMW Group, 2022). L'AI è applicata anche in relazione alla manutenzione degli impianti, con benefici tangibili in termini di continuità produttiva. A Regensburg, a partire dal 2023, è attivo un sistema di monitoraggio intelligente che realizza una manutenzione predittiva proattiva, in grado di identificare tempestivamente potenziali guasti ed evitarli, mantenendo così un flusso di produzione ottimale dei veicoli (BMW Group, 2023). Ciò evita circa 500 minuti in media all'anno di fermo linea (pari a oltre 8 ore di produzione salvaguardate, equivalenti a centinaia di veicoli che escono regolarmente dalla linea) (BMW Group, 2023). Ad oggi, circa l'80% delle linee di assemblaggio principali è monitorata in questo modo e tale soluzione è già stata utilizzata anche nei sistemi di trasporto degli stabilimenti di Dingolfing, Lipsia e Berlino (BMW Group, 2023). Nello stabilimento di Landshut, invece, dove il BMW

Group produce parti critiche per i veicoli elettrici, l'AI è integrata in un sistema di tomografia computerizzata in linea per controlli qualità al 100%. Ogni singolo alloggiamento per motore elettrico prodotto viene sottoposto a una scansione TC completamente automatizzata: in soli 42 secondi, 2.400 singole immagini vengono acquisite e ricostruite in un modello 3D del componente (BMW Group, 2025). Attraverso questa applicazione, è possibile integrare la potente tecnologia CT direttamente nei flussi di produzione senza alcun collo di bottiglia, garantendo al contempo una qualità senza difetti sulle parti critiche. In ultimo, nel contesto dell'industria 4.0, BMW ha anche sperimentato dei robot dotati di AI nelle linee produttive per supportare gli operatori. Ad esempio, sistemi robotizzati di *handling* e assemblaggio impiegano la visione artificiale per riconoscere pezzi e persone in officina, coordinando i loro movimenti in modo da lavorare in sicurezza fianco a fianco con gli umani. Inoltre, l'integrazione dell'AI consente a questi robot di apprendere percorsi ottimali ed evitare collisioni con carrelli o persone, migliorando la velocità e la precisione delle operazioni ripetitive (BMW Group, 2020). Infine, una delle tecnologie basate sull'AI più entusiasmanti del BMW Group è il sistema Car2X. Esso si basa su un cloud che consente la comunicazione e l'interazione in tempo reale tra il veicolo e il sistema di produzione BMW durante il processo produttivo. Oltre a Car2X, la piattaforma IT personalizzata AIQX (*Artificial Intelligence Quality Next*) è un componente fondamentale della BMW iFactory: tramite telecamere e sensori installati nel nastro trasportatore, l'algoritmo è in grado di analizzare i dati registrati in tempo reale e di inviare ai dipendenti sulla linea di produzione un feedback immediato tramite dispositivi intelligenti. Esso, pertanto, risulta particolarmente utile per determinare le varianti del processo di produzione, verificare la completezza dello stesso ed evitare anomalie (BMW Group, 2023). Nel complesso, la strategia principale di BMW è quella di sostituire gradualmente attrezzature fisse con soluzioni AI flessibili: ad esempio, costose stazioni camera fisse possono tranquillamente essere rimpiazzate da videocamere e software AI addestrati dal personale stesso in modo da creare una rete neurale in grado di valutare le immagini raccolte senza l'intervento umano (BMW Group, 2019).

In ambito logistico, grazie all'introduzione del progetto SAP "Rise" il quale unifica i dati e standardizza i flussi logistici in tutti gli stabilimenti mondiali, BMW è stata in

grado di implementare la cosiddetta *Parts Process Chain*: una catena che consente il controllo digitale di tutti i componenti prodotti internamente e di quelli provenienti da fornitori esterni (BMW Group, 2024). Questo sistema, esteso progressivamente a tutti gli stabilimenti (Oxford e Regensburg nel 2023, Monaco e il nuovo impianto di Debrecen entro fine 2024), garantisce un'ottimizzazione della collaborazione con i fornitori, efficienza nello stoccaggio e nell'approvvigionamento e, infine, consente di reagire più velocemente a variazioni del mercato o a interruzioni nella fornitura, assicurando operazioni stabili e flessibili (BMW Group, 2024). Con riferimento alla logistica in entrata, un altro progetto interessante è nato dalla collaborazione di BMW con l'Università di Landshut. Lo stabilimento di Dingolfing movimentava circa 1.600 tipologie diverse di cassoni ogni giorno per rifornire le linee; fino ad oggi il conteggio degli imballi vuoti (da riutilizzare per nuove parti) avveniva manualmente, con spreco di tempo e rischio di errori. Grazie ad un'applicazione sviluppata in soli tre mesi da un team di studenti, il conteggio dei cassoni vuoti avviene in maniera del tutto automatica: basta girare un breve video con uno smartphone camminando tra le file di contenitori, inquadrando i codici QR posizionati sopra le corsie di stoccaggio, l'intelligenza artificiale analizza il filmato e calcola il numero esatto di cassoni per ciascuna tipologia (BMW Group, 2023). Tuttavia, l'evoluzione digitale del BMW Group negli ultimi anni non si è limitata alle applicazioni software: in particolar modo, il gruppo sta investendo da anni in robot logistici autonomi equipaggiati con AI, per efficientare il movimento di materiali all'interno degli stabilimenti. Già a partire dal 2020, infatti, in collaborazione con NVIDIA, il gruppo BMW ha introdotto e testato Smart Transport Robots (STR) a guida autonoma per la movimentazione dei componenti tra magazzino e linee: grazie ai miglioramenti apportati al sistema di navigazione, essi sono in grado di identificare ostacoli come carrelli elevatori, treni trainati e persone in modo più rapido e chiaro, calcolando eventualmente percorsi alternativi in pochi millisecondi (BMW Group, 2020). L'impiego di questi robot intelligenti ha incrementato la velocità e la flessibilità della logistica di fabbrica: materiali e componenti arrivano alle postazioni con meno interventi umani, riducendo errori e incidenti (BMW Group, 2020). Nel 2022, presso lo stabilimento di Regensburg, è stato introdotto anche un veicolo a guida autonoma per il reparto presse: esso trasporta in autonomia le lamiere stampate, navigando con precisione tra le macchine senza conducente (BMW Group, 2024). Inoltre, BMW ha

sviluppato anche robot logistici fissi in grado di prelevare e movimentare componenti nei magazzini (es. bracci robotizzati AI), anch'essi basati su algoritmi di ottimizzazione che assegnano le missioni ai vari robot minimizzando i tempi di percorrenza e le attese (BMW Group, 2020).

Un altro contributo dell'AI alla logistica BMW è nella pianificazione virtuale degli stabilimenti e dei processi. Attraverso delle scansioni 3D potenziate dall'AI, l'algoritmo è in grado di riconoscere diversi oggetti (come container, strutture edilizie o macchinari) e di utilizzare queste informazioni per creare una mappa digitale dettagliata di interi edifici e fabbriche (BMW Group, 2020). Gli ingegneri possono poi rimuovere, spostare o aggiungere virtualmente elementi nel layout, e l'AI ricalcola i percorsi ottimali di movimentazione e la capacità dei buffer, simulando le modifiche prima di attuarle fisicamente (BMW Group, 2020). Questo sistema permette di ottimizzare l'uso degli spazi, con un impatto positivo sia sui costi sia sulla sostenibilità: esso è stato fondamentale, ad esempio, per riconfigurare i reparti produttivi in vista dell'introduzione di nuovi modelli o batterie, garantendo che la logistica fosse preparata a nuovi flussi senza rallentamenti (BMW Group, 2020).

Infine, oltre alle operazioni interne, il BMW Group ha applicato l'AI anche nel monitoraggio della catena di fornitura e nei processi d'acquisto. Nei suoi hub digitali, come quello di Bucarest, sviluppa sistemi di data analytics e machine learning che analizzano i dati dei fornitori, segnalano possibili problemi e aiutano a pianificare meglio gli ordini (BMW Group, 2023). Dal 2023 sono stati introdotti anche assistenti AI generativi pensati per chi si occupa di acquisti: il *Tender Assistant* suggerisce testi e modelli per i documenti di gara, mentre l'*Offer Analyst* confronta le offerte dei fornitori, mettendo in evidenza le differenze più importanti e le possibili criticità (BMW Group, 2024). In più, attraverso BMW i Ventures, il fondo di investimento del gruppo, l'azienda sostiene startup innovative che lavorano con l'AI: un esempio è Verusen, su cui BMW ha investito nel 2021 (BMW Group, 2021).

### **3.2.3 Risultati ottenuti e impatti sul commercio estero**

L'introduzione dell'intelligenza artificiale nei processi produttivi e logistici del BMW Group non ha rappresentato solo un passo tecnologico, ma ha avuto effetti misurabili

sulle performance aziendali. In particolar modo, nella produzione, l'automazione dei controlli qualità ha permesso un miglioramento dell'efficienza degli stessi e allo stesso tempo una riduzione dei tempi di ispezione di ciascun veicolo: a Landshut, l'algoritmo analizza 50 caratteristiche della cabina di pilotaggio in circa 30 secondi (BMW Group, 2019). È importante ricordare che tali verifiche, se effettuate manualmente, richiederebbero tempistiche ben maggiori; inoltre, l'AI ha eliminato attività ripetitive per gli operatori, che possono dedicarsi ad altri compiti produttivi (BMW Group, 2019). La manutenzione predittiva, come detto in precedenza, ha evitato in media circa 500 minuti di interruzione all'anno nell'assemblaggio dei veicoli: questo risultato, esteso agli altri impianti, equivale a diverse giornate di produzione aggiuntive su base annua (BMW Group, 2023). Anche il progetto BMW iFactory ha riportato risultati notevoli: l'uso di soluzioni AI interne, come le piattaforme Car2X e AIQX, ha reso la produzione più veloce, affidabile ed efficiente (BMW Group, 2023); inoltre, grazie alla capacità dell'algoritmo di simulare e ottimizzare virtualmente le fabbriche, è stato possibile ridurre i tempi di pianificazione, migliorare la flessibilità e la precisione, e rendere i processi di produzione più efficienti di circa il 30% (NVIDIA, 2021). Nella logistica, i robot autonomi e le soluzioni di AI planning hanno ottimizzato i flussi interni, accorciando i tempi di movimentazione dei materiali e riducendo quelli morti. L'AI consente anche di reagire più velocemente ai cambiamenti: ad esempio, il sistema digitale *Parts Process Chain* con informazioni in tempo reale ha permesso a BMW di adeguare rapidamente la produzione durante le recenti crisi di approvvigionamento globali (BMW Group, 2023).

Dal punto di vista economico, molte applicazioni AI hanno un ritorno tangibile. In generale, uno degli aspetti fondamentali della trasformazione digitale messa in atto da BMW è il ROI, ovvero il *return on investments*: questo indica che ogni progetto viene valutato anche in base ai benefici economici apportati (BMW Group, n.d.). Un esempio concreto, come afferma Kasper Sage, partner di BMW i Ventures, sono i software di ottimizzazione dell'inventario: essi hanno permesso alle aziende di risparmiare decine di milioni di dollari in costi di investimento, sprecati ogni anno a causa di una cattiva gestione dell'inventario (BMW Group, 2021). Sul piano produttivo, evitare problemi come guasti o imperfezioni significa spendere meno in correzioni, rielaborazioni ed assistenza: grazie ai sistemi di visione artificiale che mirano all'assenza di difetti, si

riducono i costi legati alle riparazioni post-produzione e alle possibili sanzioni per consegne non conformi. Allo stesso tempo, assicurare la qualità fin da subito aumenta l'efficienza di ogni operatore (con meno tempo dedicato a verifiche e rifiniture). Anche i robot logistici AI hanno contribuito a ridurre i costi operativi: grazie alla navigazione ottimizzata e alla capacità di funzionare 24/7, essi diminuiscono la necessità di manodopera per trasporti interni e possono abbreviare i turni o evitare straordinari (BMW Group, 2020).

Un altro aspetto da considerare, sebbene meno immediato, è il miglioramento della qualità dei prodotti e processi, che porta con sé benefici ambientali e di reputazione. Le tecnologie AI hanno aiutato BMW a raggiungere livelli di qualità prossimi allo zero difetti, sia in termini di produzione sia di fornitura. Un esempio è la produzione del BMW Energy Master, l'unità di controllo centrale della batteria ad alto voltaggio per i veicoli della Nuova Classe. Il monitoraggio completo in linea, inclusi i sistemi di telecamere basati sull'intelligenza artificiale e i test di fine linea al 100% in camera bianca, garantisce una qualità così alta da evitare resi o rilavorazioni nei vari stabilimenti di assemblaggio batterie nel mondo (BMW Group, 2023). Inoltre, meno difetti e guasti comportano anche clienti più soddisfatti e meno richiami, consolidando il prestigio del brand (BMW Group, 2019). In termini di impatto ambientale, la logistica ottimizzata dall'AI contribuisce notevolmente a ridurre le emissioni: i tragitti dei robot sono studiati appositamente per accorciare le distanze, i camion interni a guida autonoma sono programmati per mantenere una velocità costante ed evitare così i picchi di consumo, ed un'accurata programmazione consente di evitare spedizioni urgenti via aerea dovute a errori o urgenze improvvise (BMW Group, 2020). Anche il concetto di "*digital twin*" degli stabilimenti aiuta la sostenibilità, permettendo di testare cambiamenti produttivi virtualmente senza dover fermare linee reali (con spreco di energia) per prove fisiche. Infine, l'AI supporta BMW nei suoi obiettivi ESG anche in modo indiretto: degli algoritmi di analisi vengono impiegati per ottimizzare l'energia consumata da impianti e linee, regolando i macchinari su parametri efficienti e anticipandone i fabbisogni (BMW Group, 2022).

In conclusione, per quanto riguarda i risultati riportati da BMW Group in ambito di esportazioni, questi si sono dimostrati più che soddisfacenti: le soluzioni di AI adottate hanno rafforzato la posizione competitiva internazionale del BMW Group, incidendo

positivamente sulla capacità di servire i mercati globali. Innanzitutto, l'aumento di efficienza produttiva ha permesso a BMW di mantenere alti i volumi di produzione nonostante le sfide degli anni recenti (crisi dei chip, pandemia). Nel 2023 il gruppo è rimasto leader mondiale nel segmento premium, producendo oltre 2,4 milioni di veicoli (BMW Group, 2024), un traguardo reso possibile anche dalla flessibilità introdotta dall'AI nelle fabbriche. Un esempio è lo stabilimento BMW di Spartanburg negli Stati Uniti: esso il primo esportatore automobilistico degli Stati Uniti da 9 anni consecutivi (Motoring Research, 2023). Nel 2021 ha raggiunto un record: 257.876 veicoli esportati, per un valore di \$10,1 miliardi, in circa 120 paesi (di questi, la Cina si colloca al primo posto con il 24% del volume) (BMW Group, 2022). Complessivamente, l'adozione diffusa di IA nella rete produttiva BMW ha aumentato l'efficienza e la resilienza: come afferma la società stessa, lo studio dei dati e l'intelligenza artificiale stanno rendendo la produzione significativamente più veloce, precisa e trasparente (BMW Group, 2023).

### **3.3 Considerazioni finali sul caso studio e spunti di riflessione**

#### **3.3.1 Vantaggi e svantaggi dell'implementazione**

Oltre ai benefici riportati in termini di miglioramento dell'efficienza produttiva, della gestione delle supply chain e di riduzione dei costi, come illustrato nel paragrafo precedente, il BMW Group ha dovuto affrontare in passato e continua a riscontrare tutt'oggi notevoli difficoltà circa l'implementazione dell'intelligenza artificiale sia nei suoi processi produttivi che in quelli logistici. Una di queste riguarda l'integrazione delle nuove tecnologie a base di AI nei sistemi già esistenti: sebbene la profonda trasformazione digitale che ha interessato il gruppo negli ultimi anni si sia basata su pilastri già presenti, il responsabile logistica Michael Nikolaides ammette che «non tutti i sistemi logistici e fonti informative si connettono al control tower di BMW in modo così fluido come vorremmo» (Automotive Logistics, 2023). In alcuni casi, infatti, i pianificatori devono ancora inserire manualmente dati nel sistema anziché scambiarli online o tramite API (Automotive Logistics, 2023). Ciò ovviamente incide non soltanto sulla visibilità di cui dispone l'azienda nei confronti dei suoi fornitori, ma risulta essere

un ostacolo anche per la piena automazione dei processi (Automotive Logistics, 2023). In ambito produttivo, come spiega lo stesso Nikolaides, una delle sfide più importanti è stata l'armonizzazione dei dati interni: «la prima lezione imparata è stata mettere ordine e struttura nei dati... da allora abbiamo integrato tutti i dati produttivi in quello che chiamiamo il nostro data lake interno» (Automotive Manufacturing Solutions, 2023). Un altro aspetto rilevante in ambito produttivo dovuto all'introduzione dell'AI in fabbrica è la resistenza umana e la necessità di formazione. BMW Group riconosce che le competenze digitali sono «una delle barriere più grandi» all'adozione dell'IA, e, per far fronte a questa situazione, investe circa 400 milioni di euro all'anno nei suoi programmi di formazione (Reuters, 2024). Moritz Kippenberger, vicepresidente per i servizi HR, il reclutamento e le qualifiche, stima che oltre il 90% delle competenze di cui la casa automobilistica ha bisogno possa essere acquisito integrando le competenze già esistenti dei suoi dipendenti con la formazione continua (Reuters, 2024). In virtù di questo, BMW ha avviato un programma globale di formazione obbligatoria per fornire a 70.000 dipendenti in 43 paesi competenze digitali, tra cui cloud computing, metaverso, analisi dei dati e intelligenza artificiale: si tratta di una delle più grandi iniziative di formazione nella storia dell'azienda (Reuters, 2024). Allo stesso tempo, afferma Kippenberger, «è importante coinvolgere tutti e renderli parte del cambiamento in arrivo, ma anche sfruttare le opportunità che cresceranno con lo sviluppo dell'intelligenza artificiale» (Reuters, 2024). Pertanto, il management sottolinea che la tecnologia deve essere vista come supporto, non come minaccia: Michael Conrad di BMW parla dell'IA come di «un supporto e abilitatore», e il suo team diffonde questo messaggio per togliere «ogni timore nei dipendenti» (AutomotiveIT, 2023). Anche sul fronte etico, il responsabile del "Progetto AI", Michael Würtenberger, ha ribadito la centralità dell'intelligenza artificiale nel processo di trasformazione digitale dell'azienda ma anche che «il focus principale rimane sulle persone»: BMW, infatti, ha stabilito delle linee guida chiare (i suoi *Seven Principles* dell'IA) che pongono l'accento su supervisione umana, trasparenza e non-discriminazione (BMW Group, 2020).

Infine, anche sul piano operativo l'IA presenta limiti intrinseci che BMW riconosce: anche se in molte aree critiche «l'IA aiuta a individuare la decisione corretta da una grande mole di dati», in altre invece il ruolo degli umani è ancora fondamentale (Automotive Logistics, 2023). Come spiega Nikolaides, «in alcuni compiti standard l'IA può sostituire

compiti manuali, specialmente nella logistica (ad esempio nei trasporti interni), ma in altre aree c'è ancora molta strada da fare prima di sostituire le persone» (Automotive Logistics, 2023). Questo significa che occorre sempre la supervisione umana, manuali di sicurezza e meccanismi di emergenza che vadano oltre la tecnologia stessa per far sì che tutto si svolga in maniera corretta ed efficiente. Inoltre, un'altra sfida cruciale per l'utilizzo dell'AI è stata ottenere la disponibilità e la qualità dei dati necessari (NVIDIA, 2023). Ad esempio, ha affermato un dirigente BMW: «disporre di immagini affidabili che rappresentino diversi scenari di produzione è fondamentale per previsioni accurate dei modelli e per il processo decisionale. Affrontare diverse attività di produzione e logistica, come la determinazione precisa del livello di riempimento di scatole, contenitori o scaffali per il trasporto, ha richiesto di risolvere un problema di lavoro manuale» (NVIDIA, 2023).

### **3.3.2 Prospettive future per l'AI nell'industria automobilistica**

Le prospettive future dell'intelligenza artificiale nell'industria automobilistica delineano uno scenario in rapido mutamento, in cui l'evoluzione tecnologica si intreccia con sfide economiche, sociali e regolatorie. In particolar modo, uno degli aspetti cruciali evidenziati dalla letteratura è come il passaggio al 6G possa costituire un punto di svolta per l'automotive, permettendo comunicazioni affidabili e a bassa latenza tra veicoli e infrastrutture, elemento essenziale per la diffusione della guida autonoma e della mobilità smart (Lang et al., 2025). Con riguardo ai veicoli del futuro, secondo l'ex CEO di Daimler, Zetsche, questi dovranno avere quattro caratteristiche: essere connessi, autonomi, condivisi ed elettrici (*CASE*) (Garikapati & Shetiya, 2024). Sulla base di questa visione, si prospetta che l'automazione di Livello 4 (guida altamente autonoma) sarà raggiunto intorno al 2030 e il Livello 5 (full-autonoma) dopo il 2040 (Garikapati & Shetiya, 2024). Pertanto, sulla base di questi studi, è possibile affermare che nel breve termine (2025-2030) l'AI conferirà ai computer capacità simili a quelle umane, rendendoli indispensabili (Rana & Khatri, 2024): nel settore auto, le officine 4.0 utilizzeranno IA per controllo qualità e manutenzione preventiva; le linee produttive integreranno robot IA-adattativi; i centri logistica impiegheranno sistemi di pianificazione automatizzati. Inoltre, si prospetta che nel 2030 i veicoli saranno quasi tutti connessi e dotati di sistemi di

assistenza avanzata (ADAS di livello 2/3). Nel lungo termine (oltre il 2030), invece, ci si aspetta un'ulteriore e profonda evoluzione: le fabbriche intelligenti dell'industria 5.0 saranno caratterizzate da una cooperazione ancora maggiore tra robot ed operatori umani, con supply chain iper-resilienti capaci di auto-organizzarsi e flotte di veicoli completamente autonomi al livello 4/5, dotati di agenti di autoapprendimento (MDPI, 2025). La stessa automobile tenderà a configurarsi come uno *software-defined vehicle*, ovvero uno “smart device su ruote” costantemente aggiornabile via cloud (Lang et al., 2025); essa, inoltre, potrà interagire in tempo reale con le infrastrutture delle smart city e con le reti energetiche, contribuendo a massimizzare sicurezza ed efficienza (Lang et al., 2025).

Sul lato economico, le case automobilistiche prevedono di spostare gran parte dei profitti dai veicoli fisici ai servizi digitali. Un'indagine IBM (2024) stima che nel 2035 oltre il 50–60% dei ricavi automobilistici deriverà da servizi software e abbonamenti (come, ad esempio, aggiornamenti OTA, connettività premium, robotaxi, ecc.), contro il 15% circa di oggi. Anche il mondo del lavoro sarà costretto a cambiare: ad oggi, secondo alcune indagini di settore, il 69% dei manager segnala una carenza di competenze software nel settore auto tanto che le aziende non prevedono di acquisire talenti adeguati per i veicoli software-defined prima del 2034 (IBM Institute for Business Value, 2024). Ci si attende, quindi, maggiori investimenti nei programmi di upskilling e reskilling, concentrandosi in particolare su competenze digitali, cybersecurity, manutenzione intelligente e IT (ad esempio, come detto in precedenza, BMW sta formando 70.000 dipendenti nelle nuove tecnologie digitali). In conclusione, a livello di regolamentazione, si prospetta che i sistemi basati sull'AI a bordo dei veicoli dovranno rispettare requisiti sempre più stringenti, dalle certificazioni di sicurezza agli audit algoritmici, mentre le istituzioni stanno già studiando modelli di governance finalizzati ad assicurare non solo la sicurezza stradale, ma anche il rispetto dei diritti dei passeggeri (Patel & Singh, 2024).

## CONCLUSIONI

In sintesi, l'analisi svolta nel presente elaborato ha mostrato come l'AI stia progressivamente trasformando l'approccio al settore manifatturiero e all'export. Tale cambiamento non interessa soltanto il fattore tecnologico, ma riguarda altresì i processi produttivi, l'organizzazione del lavoro, le relazioni commerciali e le dinamiche competitive globali. Infatti, l'ampia adozione di sistemi intelligenti nella produzione e nella supply chain dimostra che l'AI può essere utilizzata come strumento per ridisegnare interamente i modelli di business e le prospettive di sviluppo, senza trascurare l'aspetto di supporto alle attività operative.

Stando a quanto è emerso dalle ricerche condotte, l'impatto dell'intelligenza artificiale non può essere inteso meramente in termini di miglioramento dell'efficienza o di riduzione dei costi: esso va ben oltre, rimodellando le dinamiche tra azienda e mercato e ponendo le basi per nuove forme di competizione internazionale. In questo contesto, la rapidità di adattamento e la capacità di integrare innovazione digitale diventano fattori decisivi.

L'esperienza del BMW Group ha evidenziato in maniera chiara ed approfondita queste dinamiche. L'azienda ha saputo utilizzare l'AI per rafforzare la propria efficienza e la propria posizione competitiva a livello internazionale, inserendo sistemi intelligenti in ogni passaggio della filiera, dalla produzione alla logistica. Anche in questo caso, i risultati ottenuti dimostrano come l'AI possa essere un elemento imprescindibile per aumentare la produttività e l'export, ma allo stesso tempo richieda una profonda riorganizzazione interna, con adeguati percorsi di formazione per i dipendenti e un'accorta gestione delle implicazioni etiche e sociali. In ultima istanza, il BMW Group è un esempio perfetto per dimostrare che la tecnologia da sola non è sufficiente per ottenere il successo: essa deve essere accompagnata da lungimiranza, governance e responsabilità.

Guardando al futuro, è evidente che l'AI giocherà un ruolo sempre più significativo. Le imprese saranno chiamate ad implementare e produrre tecnologie più avanzate, come i veicoli autonomi e i digital twin, in modo da adeguarsi ad un contesto normativo sempre più attento a questioni di carattere etico ed ambientale. Tutto ciò condurrà, inevitabilmente, a cambiamenti inediti sia nel mondo del lavoro che nella società stessa: la vera sfida, infatti, sarà conciliare la spinta di innovazione con i principi di equità e

inclusione, facendo sì che l'AI diventi un'opportunità per uno sviluppo condiviso e non allarghi ulteriormente il divario tra le persone.

In conclusione, ciò che emerge da questo studio è che l'Intelligenza Artificiale rappresenta una delle sfide più significative e al tempo stesso più promettenti per l'economia contemporanea. La sua riuscita dipenderà dalle scelte effettuate oggi: dalla capacità delle imprese di integrare l'innovazione senza però dimenticare l'importanza del capitale umano, e dalla prontezza delle istituzioni nel definire regole eque e previdenti. È qui che si decide se l'AI sarà ricordata come una minaccia da contenere oppure come lo strumento che ci ha permesso di immaginare e costruire un nuovo modello di sviluppo, più competitivo ma anche più giusto e sostenibile.

## BIBLIOGRAFIA

Acemoglu, D., Autor, D., Hazell, J., & Restrepo, P. (2025). *Artificial intelligence and jobs: Evidence from online vacancies*. *Research in Labor Economics*, 53, 151–190.

Ambrosetti, The European House e Workday. (2022). *The European House*.

Applied System Innovation. (2025). *Artificial Intelligence in the Automotive Industry: Opportunities, Challenges, and Future Directions*. MDPI.

Assolombarda. (2021). *Il futuro della fabbrica*.

Automotive Logistics. (2023, May 22). *BMW's lean, green and digital difference*. Automotive Logistics.

Automotive Logistics. (2024, June 27). *From chatbots to control towers: How OEMs and suppliers are using AI to strengthen automotive supply chains and manage risk*.

Automotive Manufacturing Solutions. (2023, September 11). *BMW reinvents its Munich plant with AI, automation and digital logistics to support Neue Klasse production and meet rising demand in a constrained city centre location*.

Automotive World. (2023, May 5). *Artificial intelligence is enhancing the auto industry across the board*.

AutomotiveIT. (2023, June 15). *Was macht ein Leiter KI-Plattformen bei BMW?* AutomotiveIT.

Barbosa, N. (2024). *Artificial Intelligence and Exporting Performance: Firm-Level Evidence from Portugal (GEE Papers 183)*. Gabinete de Estratégia e Estudos, Ministério da Economia.

Bergeaud, A., Ferrando, A., & Reinhard, L. (2025, March 28). *AI can boost productivity – if firms use it*. European Central Bank Blog.

BMW Group. (2019, October 14). *Fast, efficient, reliable: Artificial intelligence in BMW Group production*. BMW Group PressClub Global.

BMW Group. (2020, May 13). *Collaboration between BMW Group and NVIDIA intensifies: Development of AI-enabled logistics robots*. BMW Group PressClub Global.

BMW Group. (2020, November 12). *BMW Group is making logistics robots faster and smarter*. BMW Group PressClub Global.

BMW Group. (2020, October 22). *Seven principles for AI: BMW Group sets out code of ethics for the use of artificial intelligence*. BMW Group PressClub Global.

BMW Group. (2021, January 28). *BMW I Ventures invests in AI-powered supply chain optimization company Verusen*. BMW Group PressClub Global.

BMW Group. (2021, February 4). *BMW I Ventures invests in inventory optimization software company Verusen to fuel intelligent, connected supply chains*. BMW Group PressClub USA.

BMW Group. (2022). *Next level electrification*. In BMW Group report 2022. BMW AG.

BMW Group. (2022, February 14). *Eight years in a row: BMW Manufacturing is largest automotive exporter in the United States*. Automotive World.

BMW Group. (2022, March 16). *Sustainability at the core of the corporate strategy*. BMW Group PressClub Global.

BMW Group. (2022, May 2). *BMW iFACTORY: The strategic vision for the global production network*. BMW AG.

BMW Group. (2023). *Automatic surface inspection and rework in the paint shop – BMW Group plant Regensburg* [Video]. BMW Group PressClub Canada.

BMW Group. (2023). *BMW Group report 2023: Management report*. BMW AG.

BMW Group. (2023). *Next level production*. In BMW Group Report 2022. BMW AG.

BMW Group. (2023, September 4). *AI innovation: BMW Group optimizes production and enhances customer experience with AIQX*. BMW Group.

BMW Group. (2023, December 7). *BMW Group Plant Dingolfing and Landshut University of Applied Sciences are developing a smart logistics solution*. BMW Group PressClub Global.

BMW Group. (2023, December 19). *BMW Group Plant Landshut focuses on digitalization in component production*. BMW Group PressClub Canada.

BMW Group. (2024). *BMW Group report 2024: Financial statements*. BMW AG.

BMW Group. (2024). *BMW Group report 2024: Management report*. BMW AG.

BMW Group. (2024, January 10). *Focus on digitalization: BMW Group strengthens production, logistics and financial processes with modern SAP architecture*. BMW Group PressClub Global.

BMW Group. (2025). *Brands & products*. BMW AG.

BMW Group. (2025). *BMW Group Plant Landshut focuses on digitalization in component production*. BMW Group PressClub Canada.

BMW Group. (2025). *BMW Motorrad presents the strongest sales result in company history*. BMW Group Press Release.

BMW Group. (2025, April 28). *Artificial intelligence as a quality booster*. BMW Group PressClub Global.

BMW Group. (n.d.). *Artificial intelligence*. BMW AG.

BMW US Capital LLC. (2025). *Annual Report 2024*. BMW AG.

Boute, R. N., & Udenio, M. (2021). *AI in Logistics and Supply Chain Management*.

Business Wire. (2025, July 7). *European automotive mobility firms adopt AI, robotics*.

Cao, J., & Zheng, M. (2024). *Application of artificial intelligence technology in the supervision of customs clearance machine inspection*. *World Customs Journal*, 18(2), 51–76.

Cannas, V. G., Taisch, M., & Sassanelli, C. (2024). *Artificial intelligence in supply chain and operations management: Multiple case study research*. *International Journal of Production Research*, 62(6), 3333–3360.

Cerutti, E., Garcia Pascual, A., Kido, Y., Li, L., Melina, G., Tavares, M. M., & Wingender, P. (2025). *The Global Impact of AI: Mind the Gap* (IMF Working Paper No. 25/76). International Monetary Fund.

Chatterjee, S., Rana, N. P., Tamilmani, K., Sharma, A., & Dwivedi, Y. K. (2024). *Artificial intelligence and future of work: A systematic review of literature and agenda for future research*. *Technological Forecasting and Social Change*, 198, 123736.

Chenavaz, R., & Dimitrov, S. (2025). *Artificial intelligence and dynamic pricing: A systematic literature review*. *Journal of Applied Economics*, 28(1).

Chishty, A. A., Hassan, M. U., & Faizan, M. (2025). *The utilization of artificial intelligence in the export performance of MNCs: The role of cultural distance*. *Administrative Sciences*, 15(5), 160.

Ciffolilli, A., & Muscio, A. (2018). *Industry 4.0: National and regional policy frameworks supporting smart manufacturing*. Springer.

Commissione Europea. (2018). *Comunicazione ... Piano coordinato sull'intelligenza artificiale*.

Commissione Europea. (2024). *Quadro normativo sull'intelligenza artificiale. Strategia digitale dell'UE*.

Commissione Europea (marzo, 2025). *Industrial action plan for the European automotive sector*.

Durrant, B. (2024). *Legal gaps in global trade governance and the rise of artificial intelligence* (SSRN Working Paper No. 4858755). Social Science Research Network.

European Automobile Manufacturers' Association. (2020, November). *Artificial intelligence in the automobile industry: ACEA position paper*.

Eurostat. (2024). *Use of artificial intelligence in enterprises*. Statistics Explained.

Ferencz, J., López González, J., & Oliván, I. (2022). *Artificial Intelligence and international trade: Some preliminary implications* (OECD Trade Policy Paper No. 260). OECD Publishing.

Floris, F. (2020). *Intelligenza artificiale. Scopo e definizione*.

Garikapati, D., & Shetiya, S. S. (2024). *Autonomous Vehicles: Evolution of Artificial Intelligence and the Current Industry Landscape*. *Big Data and Cognitive Computing*, 8(4), 42.

Gendy, W., & Patel, D. (2024). *Advancements in computer vision: A comprehensive survey of image processing and interdisciplinary applications*. *Academic Journal of Science and Technology*, 13(2), 28–34.

Global Trade Magazine. (2023). *AI in Supply Chain Industry Booms: USD 157.6 Billion Revenue by 2033*.

Goldman Sachs. (2023, April 5). *Generative AI could raise global GDP by 7%*. Goldman Sachs Research.

Gorecky, D., Schmitt, M., Loskyll, M., & Zühlke, D. (2014). *Human-machine-interaction in the industry 4.0 era*. In *Industrial Informatics* (pp. 289–294). IEEE.

IBM. (2024). *What Is NLP (Natural Language Processing)?*

IBM. (n.d.). *Deep Learning*.

IBM Institute for Business Value. (2024). *Automotive 2035: Transitioning from ICE vehicles to EVs*. IBM.

Innovation Post. (2023). *Tecnologie abilitanti per Industria 4.0*.

International Federation of Robotics. (2024, February 21). *Top 5 robot trends 2024*.

International Federation of Robotics. (2024, May 14). *Europe's auto industry installed 23,000 new robots*.

International Monetary Fund. (2025). *Artificial Intelligence and Sectoral Transformation in Europe* (IMF Working Paper No. 2025/067).

International Monetary Fund. (2025). *The global impact of AI: Mind the gap* (IMF Working Paper No. 25/79).

Ionașcu, C. M., Dospinescu, N., Ionașcu, L., & Onofrei, A. R. (2024). *Artificial Intelligence Adoption in the European Union: A Data-Driven Cluster Analysis (2021–2024)*. *Economies*, 13(5), 145.

Istat. (2017). *Rapporto annuale 2017 – La situazione del Paese*. Istituto Nazionale di Statistica.

Just Security. (2024, April 4). *AI at the border: Emerging ethical and legal dilemmas*. New York University School of Law.

Kumar, A. (2023). *Impact of Artificial Intelligence on Supply Chain Management*. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 4(4), 1807–1811.

Lang, P., Tian, D., Han, X., Zhang, P., Duan, X., Zhou, J., & Leung, V. C. M. (2025). *Towards 6G vehicular networks: Vision, technologies, and open challenges*. *Computer Networks*, 257, 110916.

Licata, P. (2024). *A comparative assessment of digital transformation in Italy*.

Lieto, A., & Pozzato, G. L. (2018). *Che cosa sono le tecnologie cognitive*. Carocci.

Lo, C. P., & Lee, Y. (2024). *Digitalization, AI intensity, and international trade*. *Annals of Economics and Finance*, 25(1), 251–273.

Lodi, M. (2021). *Imparare il pensiero computazionale, imparare a programmare*.

Longo, G. (2008). *Il test di Turing: criteri, equivoci, attualità*. DISF.

Marzano, R. (2001). *Specializzazione produttiva e competitività territoriale nell'industria manifatturiera italiana*. Working Paper n. 39, Università Cattolica.

McKinsey & Company. (2021). *Capturing the true value of Industry 4.0*.

McKinsey & Company. (2021). *Succeeding in the AI supply-chain revolution*.

McKinsey & Company. (2023). *The economic potential of generative AI: The next productivity frontier*. McKinsey Global Institute.

McKinsey & Company. (2024, June 13). *European automotive industry: What it takes to regain competitiveness*.

McKinsey & Company. (2024, October 3). *Europe's economic potential in the shift to electric vehicles*.

Misch, F., Park, B., Pizzinelli, C., & Sher, G. (2025). *Artificial Intelligence and Productivity in Europe* (IMF Working Paper No. 25/67). International Monetary Fund.

Mishra, S., Koopman, R., De Prato, G., et al. (2023). *AI specialization for pathways of economic diversification*. Scientific Reports, 13, 19475.

Motoring Research. (2023, February 13). *BMW becomes America's biggest car exporter for ninth year in a row*. Motoring Research.

NVIDIA. (2021, April 13). *NVIDIA and BMW reimagine factory of the future*. The Official NVIDIA Blog.

NVIDIA. (2023). *BMW optimizes production with AI and DGX systems*. NVIDIA Customer Stories.

OECD. (2025). *Emerging divides in the transition to artificial intelligence*. OECD Publishing.

Organization for Economic Co-operation and Development. (2022). *Artificial intelligence and international trade: Some preliminary implications*. OECD Publishing.

Organization for Economic Co-operation and Development. (2024). *Strategic foresight background note: AI, geopolitics and global cooperation (GSG (2024)1)*. OECD Publishing.

Organization for Economic Co-operation and Development. (2025). *Emerging divides in the transition to artificial intelligence*. OECD Publishing.

Osservatori Digital Innovation. (2019). *Storia dell'intelligenza artificiale*.

Osservatori Digital Innovation. (2021). *Cos'è il Deep Learning: esempi e applicazioni reali*.

Parlamento europeo e Consiglio dell'Unione europea. (2024). *Regolamento (UE) 2024/1689 ... legge sull'intelligenza artificiale*. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 168/1.

Parlamento Europeo. (2020). *The impact of the General Data Protection Regulation (GDPR) on artificial intelligence*.

Portinale, L. (2022). *Sistemi esperti*.

PWC. (2016). *Industry 4.0: Building the digital enterprise*.

Rana, K., & Khatri, N. (2024). *Automotive intelligence: Unleashing the potential of AI beyond advance driver assisting system, a comprehensive review*. Computers and Electrical Engineering, 117, Article 109237.

Salamone, G. (2020). *Industria 4.0: definizione, vantaggi e tecnologie*. Dgroove, 24 giugno.

Salviotti, G. (2017). *Digitale e Manifatturiero. Impatti, prospettive e stato dell'arte per le aziende italiane*.

SAP. (n.d.). *What is Predictive Maintenance*.

Schiaffonati, V. (2010). *Ingegneria e filosofia dell'intelligenza artificiale*. *Mondo Digitale*, (37), 45–52.

ScienceDirect Topics. (n.d.). *Natural Language Processing – an overview*.

Shalev-Shwartz, S., & Ben-David, S. (2014). *Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms*. Cambridge University Press.

Shekhar, A., Prabhat, P., Yandrapalli, V., Umar, S., Abdul, F., & Wakjira, W. D. (2024). *Generative AI in Supply Chain Management*. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15(3), 123–135.

Shen, Y., Zhang, X., Zhu, J., & Li, L. (2024). *The impact of artificial intelligence on employment: The role of virtual agglomeration*. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11, Article 122.

Shoushtari, F., Ghafourian, E., & Talebi, M. (2022). *Improving Performance of Supply Chain by Applying Artificial Intelligence*. *International Journal of Industrial Engineering and Operational Research*.

Sinopoli, L., Cucchiella, F., Gastaldi, M., & Miliacca, M. (2023). *Natural Language Processing applications in manufacturing: A systematic literature review*. ResearchGate.

Smeup. (2022). *Machine Learning per le aziende*.

Suma, K. G., Patil, P., & Sunitha, G. (2024). *Computer vision and its intelligence in Industry 4.0*. IGI Global.

Szalavetz, A. (2021). *Industry 4.0 and capability development in manufacturing subsidiaries*. *Technological Forecasting and Social Change*, 169, 120804.

Trade Finance Global. (2024). *Conclusions from WTO's Trading with Intelligence*.

Tzafestas, S. G., Kokkinaki, A. I., & Valavanis, K. P. (1991). *An overview of expert systems*. In *Expert Systems in Engineering Applications*.

UNESCO. (2021). *Recommendation on the ethics of artificial intelligence*. UNESCO.

World Economic Forum. (2021, June 16). *The automobile industry needs to steer in this direction for future success*.

World Trade Organization. (2024). *Trading with intelligence: How artificial intelligence shapes and is shaped by international trade*. WTO.

Zhou, H., Wang, L., Cao, Y., & Li, J. (2025). *The impact of artificial intelligence on labor market: A study based on bibliometric analysis*. *Journal of Asian Economics*, 98, 101926.