



# Industria 4.0 e Smart Factories: l'impatto della stampa 3D e dell'automazione sul lavoro manifatturiero europeo

Prof.ssa Valentina Meliciani

---

RELATORE

Prof. Fabrizio Pompei

---

CORRELATORE

Dario Amitrano - 788641

---

CANDIDATO

# **Sommario**

## Introduzione

### **Capitolo 1 – Industria 4.0, Smart Factories e lavoro manifatturiero: una revisione della letteratura**

- 1.1 Le quattro rivoluzioni industriali e l’evoluzione del lavoro
- 1.2 Automazione, robotica e job polarization
- 1.3 L’intelligenza artificiale e la digitalizzazione dei processi
- 1.4 Sostituzione vs complementarità: il ruolo delle competenze
- 1.5 Tecnologie emergenti: stampa 3D, robotica e sistemi intelligenti
- 1.6 L’impatto settoriale e demografico delle tecnologie: genere, età e skill
- 1.7 Le sfide delle politiche industriali, educative e territoriali
- 1.8 Sintesi critica e spazi di ricerca aperti

### **Capitolo 2 – Implicazioni e prospettive per il lavoro manifatturiero europeo nell’era digitale**

- 2.1 Introduzione: dal quadro teorico ai dati comparativi
- 2.2 Il Digital Economy and Society Index (DESI) e altri strumenti di misurazione
- 2.3 Adozione delle tecnologie digitali e 4.0 in Europa
- 2.4 Competenze digitali e capitale umano
- 2.5 Studi di caso e best practices europee
- 2.6 Conclusioni

## **Bibliografia**

## **Sitografia**

# **INTRODUZIONE**

*Negli ultimi anni il termine Industria 4.0 è diventato cruciale nel dibattito politico ed economico dei paesi, indicando una profonda trasformazione dei processi produttivi. Digitalizzazione e automazione caratterizzano la nuova fase della manifattura, in cui fabbriche e sistemi intelligenti ridefiniscono tempi, spazi e modalità del lavoro.*

*Questa tesi nasce dall'esigenza di comprendere come tali cambiamenti si riflettano sul mondo produttivo europeo, in particolare, quali saranno le sfide e le opportunità che emergeranno in relazione all'adozione delle nuove tecnologie della transizione: stampa 3D, robotica e software di intelligenza artificiale.*

*La letteratura ha discusso ampiamente scenari contrapposti: alcuni vedono nella digitalizzazione una minaccia ai posti di lavoro, altri la considerano un fattore di crescita e di riqualificazione. Tuttavia, l'effetto non è mai deterministico ma dipende da vari fattori: settore, capitale umano e politiche utilizzate.*

*Dal punto di vista metodologico, la tesi combina un approccio qualitativo con un'analisi quantitativa basata su indicatori statistici internazionali. Questa integrazione consente di collocare le teorie in un quadro empirico, in modo tale da valutare i punti di forza, le debolezze e le traiettorie di sviluppo nell'adozione delle tecnologie 4.0.*

*La struttura si articola in due capitoli:*

1. *Presentazione del quadro teorico e degli studi sul rapporto tra automazione, innovazione e lavoro; analisi dei concetti di job polarization, sostituzione vs complementarità e ruolo delle competenze, con un focus maggiore sulla stampa 3D, la robotica e i sistemi di intelligenza artificiale.*
2. *Confronto empirico su scala europea, introduzione degli indicatori DESI e degli altri dataset, con tabelle e commento dei risultati, al fine di tracciare un quadro comparativo e definire le best practices*

*L'elaborato intende offrire un supporto concreto con l'obiettivo di dimostrare che l'impatto delle tecnologie 4.0 dipende fortemente da come esse vengono adottate e dalle politiche di formazione e industriali mirate. In questa prospettiva, la tesi vuole sottolineare che non è la tecnologia in sé a determinare il futuro del lavoro, bensì l'interazione tra innovazione, competenze e governance aziendale.*

## **Capitolo 1 – Industria 4.0, Smart Factories e lavoro manifatturiero: una revisione della letteratura**

### **1.1 Le quattro rivoluzioni industriali e l'evoluzione del lavoro**

Il concetto di rivoluzione industriale rappresenta, da sempre, una chiave di lettura fondamentale per apprendere il cambiamento e le trasformazioni storiche dell'organizzazione economica, del lavoro e della tecnologia. Al giorno d'oggi, abbiamo visto il susseguirsi di quattro grandi fasi evolutive, ciascuna caratterizzata da innovazioni tecnologiche radicali e dalla riorganizzazione del lavoro, che hanno portato a profondi cambiamenti nello sviluppo industriale dell'epoca.

La prima rivoluzione, iniziata nella seconda metà del XVIII secolo, fu segnata dall'introduzione della macchina a vapore e da nuovi macchinari tessili come il telaio di Cartwright. L'introduzione di questi primi macchinari segnò l'evoluzione della produzione, fino a quel momento del tutto artigianale, a una produzione più meccanizzata e concentrata all'interno delle fabbriche, portando così alla migrazione della popolazione verso i centri urbanizzati e cambiando per sempre la divisione del lavoro. Ci fu infatti un duplice effetto: da un lato molto dei mestieri tradizionali persero importanza fino a scomparire, dall'altro nacquero nuove professioni per la gestione e la manutenzione dei nuovi macchinari.

La seconda rivoluzione, che si sviluppò tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo, si contraddistinse per l'utilizzo dell'elettricità, del motore a combustione interna e del telefono, strumenti che segnarono l'inizio di una nuova epoca. Grazie a nuovi modelli come quello fordista, la catena di montaggio più sviluppata riuscì a ridurre i tempi di produzione, rendendo così i beni di consumo, accessibili a una platea sempre più ampia. Questa fase comportò una forte crescita a livello di occupazione manifatturiera, meccanizzazione delle mansioni e standardizzazione delle competenze richieste ai lavoratori.

La terza rivoluzione industriale prende il nome di rivoluzione digitale in quanto fu caratterizzata dall'avvento dell'elettronica, dell'informatica e dei sistemi automatizzati. Le modalità di produzione cambiarono totalmente con l'introduzione del microprocessore (Intel, 1971), dei software e dei robot industriali. Le fabbriche iniziarono ad automatizzare processi interi di produzione, favorendo così la nascita di nuove professioni tecniche e informatiche a discapito di tutte quelle attività ripetitive facilmente sostituibili. È proprio in questo periodo che nasce il concetto di polarizzazione del lavoro: si verifica una riduzione dei lavori di media qualifica e allo stesso tempo un aumento di quelli più qualificati (ingegneri, tecnici specializzati, management) e di quelli meno qualificati, ossia lavori manuali che non potevano essere automatizzati.

L'ultima rivoluzione industriale, la quarta, si contraddistingue dalle precedenti rivoluzioni per la velocità e la rapidità del cambiamento e per l'impatto che ha avuto su tutti i settori industriali. Ciò che differenzia dunque questa rivoluzione dalle altre è che tutti i progressi tecnologici si sono verificati a una velocità esponenziale e non più lineare, coinvolgendo ed influenzando ogni aspetto

della società. Questa transizione ha avuto effetti diretti e indiretti sull'occupazione. Le nuove tecnologie, infatti, hanno aumentato l'efficienza della produzione riducendo i costi, ma hanno anche sostituito intere categorie professionali. Tuttavia, non possiamo considerare solo gli effetti negativi: le rivoluzioni industriali, infatti, pur causando inizialmente la perdita e la sostituzione di molti lavori, hanno sempre prodotto nuove occupazioni e trasformato le competenze richieste. Il punto cruciale, dunque, rimane la gestione del cambiamento: nelle strategie di politica industriale, nel sistema educativo e nella resilienza delle imprese e dei territori. Come dimostrato dalla letteratura (Acemoglu e Restrepo, 2020; Brynjolfsson e McAfee, 2014) la capacità di investire simultaneamente in tecnologia, formazione e innovazione comporta la trasformazione delle rivoluzioni industriali in occasioni di sviluppo.

## 1.2 Automazione, robotica e job polarization

Dall'inizio degli anni Ottanta, l'avvento dell'automazione industriale rappresenta una delle principali trasformazioni strutturali nel mondo del lavoro, attraverso l'introduzione di robot industriali e software avanzati, i processi produttivi hanno subito un radicale cambiamento, modificando così l'organizzazione dei modelli su sistemi altamente specializzati e digitalizzati e non più sulla sola forza lavoro. Tale evoluzione ha innescato una ristrutturazione delle mansioni e delle competenze richieste attraverso una segmentazione del lavoro. Uno dei primi concetti emersi nella letteratura per rilevanza è quello della cosiddetta job polarization, teorizzato inizialmente da Autor, Levy, e Murnane (2003) e successivamente sviluppato da Goos e Manning (2007), i quali evidenziarono come l'automazione non colpisca tutte le categorie professionali indistintamente, ma tende a sostituire prevalentemente quelle di media qualifica, lasciando dunque spazio alle occupazioni di alta qualifica, come quelle legate alla direzione, progettazione, ricerca e management, e a quelle di bassa qualifica, come logistica, manutenzione, ecc. Per tutte queste occupazioni, infatti, in un primo momento, la sostituzione risultava svantaggiosa, sia per la complessità che per un ritorno economico.

Il concetto di polarizzazione del lavoro è stato ripreso negli anni da numerosi studi, come evidenziato dai dati riportati da Graezi e Michaels (2018), l'avvento dell'automazione e dell'adozione su larga scala in Europa di robot industriali ha comportato una crescita significativa della produttività nei settori manifatturieri, accompagnata però da un'influenza negativa sul numero dei posti di lavoro manuali. Parallelamente, Acemoglu e Restrepo (2020) hanno distinto le tecnologie in due grandi categorie. Quelle sostitutive, che rimpiazziamo direttamente l'intervento umano, e le tecnologie complementari, che invece si offrono da supporto e migliorano la

produttività del lavoratore, migliorandone e facilitandone i compiti. Tale distinzione risulta centrale per comprendere al meglio che l'impatto e gli effetti della tecnologia non dipendono esclusivamente dal tipo di innovazione utilizzata, ma anche dal contesto organizzativo e dalla capacità del sistema economico di integrare efficacemente queste innovazioni nei vari processi produttivi.

Negli anni più recenti il concetto di job polarization è stato analizzato per dare alla luce ancora più risposte. Secondo i dati riportati nel paper CESifo di Prytkova et al. (2024), l'esposizione settoriale alle tecnologie emergenti è fortemente correlato con un impatto polarizzante sull'occupazione, confermando una riduzione dell'incidenza delle professioni di media qualifica. In particolare, nel documento vengono analizzati gli effetti di circa 40 tecnologie emergenti, tra cui robotica, AI, stampa 3D..., utilizzando un innovativo indice, il TechXposure. Tale indice, in grado di mappare l'esposizione tecnologica di tutte le professioni europee, venne utilizzato per confermare il concetto di polarizzazione. Un esempio concreto di questo fenomeno è rappresentato dal caso Foxcoon, il gigante cinese dell'industria elettronica, che ha sostituito più di 400.000 lavoratori attraverso un processo di automazione e con l'obiettivo di realizzare una produzione completamente automatizzata entro il 2030. Allo stesso modo, come possiamo vedere nel settore automobilistico, aziende come Tesla, hanno iniziato ad utilizzare la robotica autonoma in tutte le fasi della catena produttiva, dall'assemblaggio alla verniciatura, fino al controllo di qualità, garantendo standard elevati e riducendo in modo significativo il lavoro umano. Nonostante, però, questi casi rappresentino degli esempi emblematici di come l'automazione possa andare a sostituire completamente il lavoro umano, bisogna sottolineare che l'impatto varia fortemente a seconda del settore, del tipo di tecnologia adottata e del modello organizzativo.

In ogni caso, i dati più recenti, confermato e rafforzano questa teoria. Uno studio condotto nel 2025 da Bogusz e Bellani, basato su dati raccolti su più di 16 paesi europei, ha evidenziato come l'introduzione dei robot industriali nelle aziende abbia avuto effetti significativi non solo sull'occupazione, ma anche sul benessere percepito dai lavoratori. In particolare, i lavoratori di media qualifica riportano una riduzione dell'insoddisfazione personale, suggerendo così che l'automazione subita può comportare una perdita di significato per l'uomo e contribuire a forme di alienazione. Dunque, l'impatto della tecnologia riguarda anche la qualità del lavoro e il benessere dei dipendenti.

Nel 2025, l'Eurobarometro ha registrato che più del 62% dei cittadini europei percepisce positivamente l'introduzione dei robot aziendali e dell'intelligenza artificiale nel luogo di lavoro, riconoscendone le potenzialità e il miglioramento della produttività. Tuttavia, questa fiducia spesso

è condizionata dal livello d'istruzione e dalla possibilità concreta di accesso alla formazione tecnologica. Da qui nasce uno dei problemi più significativi che comporta la distinzione tra lavoratori qualificati e non qualificati. Il divario sta crescendo sempre di più e rischia di crescere ancora in quanto mentre i qualificati riescono a sfruttare le opportunità che la tecnologia offre, i meno qualificati rischiano di essere sostituiti arrivando alla precarizzazione.

Nel 2025, l'OCSE e la commissione europea, attraverso il rapporto Digital Labour Markets and Industrial Transformation (OECD, 2025) ha utilizzato dati panel su più di 30 paesi per analizzare la job polarization nel settore manifatturiero, rilevando una forte accelerazione della sostituzione degli ottimi low-skill ma al contempo un'espansione delle posizioni legate alla supervisione, al controllo qualità e all'integrazione digitale.

Inoltre, recenti ricerche del World Economic Forum (2025) indicano che la polarizzazione non riguarda solo l'occupazione, ma si manifesta anche sul piano salariale. Infatti, mentre i lavoratori ad alta qualifica, coinvolti in mansioni strategiche e nella gestione di questi processi automatizzati, registrano una crescita delle loro retribuzioni, i lavoratori di media qualifica, soprattutto in quei settori ad alta intensità tecnologica, registrano una riduzione dello stesso. Tale fenomeno, nel caso in cui non dovesse essere supportato da politiche redistributive e da percorsi efficaci di riqualificazione, porterà a rafforzare le diseguaglianze strutturali nel mondo.

Infine, uno degli aspetti più discussi nella letteratura recente riguarda la possibilità da parte delle aziende, attraverso le scelte strategiche, di cambiare l'impatto dell'automazione. Nelle organizzazioni che mettono al centro l'importanza della formazione dei dipendenti attraverso investimenti, rendendoli così attivamente coinvolti nei processi di innovazione, la tecnologia risulta complementare ed è in grado di potenziare efficacemente la performance lavorativa. Al contrario, nelle organizzazioni in cui l'automazione non è accompagnata da una formazione delle competenze dei dipendenti, prevale l'effetto sostitutivo.

In conclusione, possiamo affermare, che sebbene l'automazione e la robotica siano un elemento centrale della trasformazione industriale contemporanea, il loro impatto sull'occupazione non può essere interpretato in chiave deterministica. Il fenomeno della polarizzazione, infatti, è il risultato di molteplici fattori: il modello organizzativo adottato, le scelte tecnologiche, la struttura produttiva, il capitale umano, il livello di formazione e soprattutto l'efficacia delle politiche pubbliche. Governare questa transizione in modo equo e inclusivo resta una delle principali sfide dell'Europa industriale del futuro.

### 1.3 L'intelligenza artificiale e la digitalizzazione dei processi

Negli ultimi anni l'intelligenza artificiale (AI) ha aperto la strada ad un'evoluzione dei sistemi di produzione e dei servizi, trasformando le modalità operative e decisionali all'interno del mercato. L'era attuale dell'intelligenza artificiale è guidata da tecnologie avanzate che operano all'interno delle Smart factories europee, andando a ricoprire quasi tutti i settori, dalla sanità alla pubblica amministrazione. L'introduzione dell'AI rappresenta una trasformazione di tipo qualitativo rispetto alla robotica tradizionale utilizzata in precedenza: le macchine, infatti, non si limitano più a riprodurre ed eseguire operazioni, ma, grazie anche al valore cognitivo, intrinseco nell'AI, riescono a trasformare compiti, ruoli e interazioni nel lavoro quotidiano.

Fin dal 2019, ricerche come quelle di Webb (2019) e Felten (2021) hanno dimostrato come l'intelligenza artificiale possa avere un impatto non trascurabile anche su tutte quelle competenze ad alta qualifica che fino ad ora erano considerate immuni all'automazione. Uno studio successivo di Prytkova et al. (CESifo, 2024) introduce l'indice TechXposure, di cui abbiamo già parlato in precedenza, frutto dell'analisi di più di 190.000 brevetti in Europa, misura l'esposizione settoriale e occupazionale alle tecnologie emergenti come l'AI, la stampa 3D e la robotica in generale. Tale analisi rivela come l'AI nel contesto europeo da un lato favorisca tutte quelle professioni qualificate come data scientist e specialisti del machine learning, dall'altro crei nuove professioni di supporto come esperti del controllo qualità e responsabili dell'operatività dell'AI.

Altri studi condotti nel 2025 (Albanesi et al.) confermano questa tendenza: le regioni con una maggiore intensità di utilizzo dell'intelligenza artificiale, e con maggiori investimenti in formazione, sono state caratterizzate da un aumento del 15% dell'occupazione per i profili tecnici, e del 7% per figure di livello intermedio come quelle di supporto e coordinamento. Viceversa, i paesi con infrastrutture digitali deboli e con un livello inferiore di formazione hanno mostrato degli effetti opposti: diminuzione dell'occupazione giovanile, riduzione del salario medio, e un aumento della visione negativa sugli effetti dell'intelligenza artificiale, la quale viene percepita come minaccia.

Vediamo che delle ricerche condotte nel Regno Unito dall'Institute for the future of Work (2025) hanno evidenziato una riduzione di circa il 33% delle offerte di lavoro entry-level dopo l'adozione degli strumenti generativi. Tale fenomeno rischia così di influenzare l'occupazione giovanile in modo consistente, aumentando il gap generazionale ed escludendo sempre più neolaureati dalle tradizionali forme di lavoro per richiedere una formazione verso ruoli specializzati in rapporto con l'AI. Dunque, l'inserimento nel mondo professionale diviene sempre più selettivo, evidenziando un'evoluzione del lavoro da una struttura gerarchica ad una struttura di reti e competenze altamente specializzate.

Parallelamente, dati di McKinsey Global Institute (2025) e Barclays (2025) indicano che l'AI non causa un calo netto dell'occupazione ma limita la crescita salariale media. In compenso però, migliora la produttività aziendale, con benefici concentrati soprattutto nelle grandi imprese capaci, attraverso una forte governance e grazie alle scelte strategiche, di governare l'integrazione tecnologica, a differenza della gran parte delle PMI, dove solo il 38% dichiara di avere una strategia AI a medio lungo termine. Questa differenza accresce la competitività tra le imprese, con rischi significativi per tutte quelle aziende che restano ancorate al modello tradizionale.

Diviene fondamentale la questione etica e normativa, che diventa centrale con l'entrata in vigore nel 2024 dell'AI Act, il primo regolamento al mondo sui sistemi ad alto rischio. Esso stabilisce criteri di adattabilità, equità e trasparenza obbligatoria per tutti i sistemi impiegati nelle decisioni legate alla salute, al lavoro, alla pubblica sicurezza e sorveglianza. Questo portò alla nascita di nuove figure professionali in quanto le aziende furono obbligate a implementare nuove forme di governance digitali come audit teams, interni ed esterni, valutazione periodica dei bias e monitoraggio continuo.

Un ambito sempre più dibattuto nell'applicazione dell'intelligenza artificiale all'interno delle smart factories riguarda il cosiddetto "algorithmic management". Con questo termine si fa riferimento all'utilizzo di algoritmi per la gestione dei turni di lavoro, per l'assegnazione di compiti, per la valutazione delle performance e per il monitoraggio di tutti i dipendenti. Da un lato questo sistema promette riduzione di costi e maggiore efficienza, dall'altro però rischia di aumentare il burnout e lo stress dei dipendenti, oltre che rappresentare una minaccia alla privacy. Non a caso l'AI Act classifica tali sistemi come "ad alto rischio", imponendo requisiti rigidi: obbligo di un sistema di gestione del rischio, documentazione tecnica completa, obbligo di trasparenza e di informazione verso gli interessati, accuratezza e sicurezza degli algoritmi utilizzati, e l'implementazione di un sistema di qualità. Tali obblighi si affiancano alle tutele già previste dal GDPR, rafforzando così l'attenzione sulla dimensione etica e sociale dell'uso dell'intelligenza artificiale.

Un altro ambito in cui l'AI mostra delle applicazioni concrete è quello del Quality 4.0: nelle smart factories europee, per esempio, vengono utilizzati dei sistemi di computer vision per l'ispezione automatica di difetti lungo la catena di produzione e strumenti predittivi in grado di prevenire e occuparsi delle manutenzioni dei macchinari. Questi casi dimostrano non solo quanto si possa risparmiare in termini di costi e tempi, ma anche la possibilità di riorganizzare il lavoro, spostando l'attività dei lavoratori da semplice ispezione a ruoli di supervisione e gestione dei sistemi digitali.

Uno dei temi emergenti più importanti degli ultimi anni è quello della sostenibilità. Riguardo all'utilizzo dell'intelligenza artificiale sappiamo che al giorno d'oggi, l'approccio tradizionale dell'AI, basato su numerosi calcoli e grandi modelli, consuma circa il 2% dell'energia globale. Per combattere ciò sono nate delle iniziative come "GREEN AI e AI 4 EARTH" (World Bank, 2025) che promuovono algoritmi ottimizzati per ridurre il consumo energetico di tali strumenti e infrastrutture cloud alimentate dall'energia rinnovabile. Alcuni grandi aziende europee hanno già iniziato ad intervenire su questo tema utilizzando energie rinnovabili e mettendo al primo posto il concetto di sostenibilità creando così un valore di responsabilità ambientale nella tecnologia che va al di là di quello puramente economico.

Sul fronte sociale abbiamo visto, e tutto ciò viene confermato dall'Eurobarometro 2025, come la maggior parte degli europei percepisca l'intelligenza artificiale come uno strumento vantaggioso per migliorare la produttività e la qualità della vita stessa. Dall'altra parte, circa il 38% degli europei esprime un senso di paura e timore riflettendo una frattura culturale non trascurabile al cui centro vi è il concetto di alfabetizzazione digitale. Per essere in grado di trarre vantaggio dall'utilizzo dell'AI bisogna mettere al primo posto la formazione continua per evitare la polarizzazione tra chi sa usare la tecnologia e chi teme di essere usato.

In ottica strategica, l'intelligenza artificiale viene considerato come uno strumento fondamentale per il futuro della produzione e del lavoro. Le Smart factories si trasformano in ecosistemi sociotecnici complessi, che richiedono competenze ibride, adozione di nuove politiche, una governance efficace e infrastrutture sostenibili. Il progresso tecnologico potrà diventare una leva importantissima, a patto che sia accompagnato da una nuova cultura digitale e da un reskilling diffuso, altrimenti potrà degenerare in distacchi territoriali, organizzativi e generazionali.

In conclusione, l'AI ha cambiato totalmente la natura del lavoro proponendo nuove sfide ed opportunità. Al giorno d'oggi non sarà più sufficiente domandarsi se tale tecnologia sostituirà i posti di lavoro ma diviene fondamentale capire come la società cercherà di governare questa rivoluzione.

## **1.4 Sostituzione vs complementarità: il ruolo delle competenze**

L'avvento delle tecnologie digitali avanzate all'interno del mondo del lavoro ha generato due interpretazioni teoriche, spesso opposte ma entrambe supportate da solide basi empiriche: da un lato vi è l'ipotesi della sostituzione tecnologica, secondo la quale l'intelligenza artificiale e

l'automazione finiranno per sostituire ed eliminare il lavoro umano in molteplici attività, dall'altro la visione della complementarità, secondo la quale la tecnologia è uno strumento, che se utilizzato con i giusti mezzi, può aumentare la produttività e l'efficienza delle capacità e delle prestazioni umane.

Un contributo fondamentale per analizzare questo rapporto proviene dagli studi basati sul task-based approach, sviluppato da Autor, Levy e Murnane e successivamente approfondito da numerosi autori. Questo approccio infatti sostiene che la tecnologia non mira a sostituire le occupazioni e le mansioni, ma piuttosto automatizza specifici compiti (task) in modo da ridefinire le mansioni svolte all'interno dei vari ruoli lavorativi. In quest'ottica, una professione non sparisce del tutto ma si evolve.

Un aspetto sottolineato nella letteratura più recente riguarda la sequenza temporale degli effetti delle nuove tecnologie. Possiamo distinguere infatti tra un primo impatto di tipo sostitutivo, evidente nel breve periodo, in cui molte mansioni vengono effettivamente automatizzate, e un effetto di tipo creativo nel lungo periodo, caratterizzato dall'emergere di nuove figure professionali e dalla riorganizzazione dei processi produttivi. Questo approccio sottolinea come i risultati concreti dipendano anche dal tempo e dalla velocità con cui avviene l'adozione tecnologica.

Inoltre, uno degli aspetti fondamentali è che non tutte le tecnologie producono lo stesso impatto: alcune, come i robot industriali impiegati soprattutto nei processi ripetitivi e standardizzati, tendono a sostituire soprattutto i ruoli manuali e di routine. Altre invece come le piattaforme di collaborazione digitale, i vari sistemi ERP o le tecnologie predittive hanno una funzione più abilitante, cioè vengono utilizzate come degli strumenti che possono rendere il lavoro umano più semplice, efficace e strategico, contribuendo a migliorarne la produttività senza effetti di eliminazione.

Risulta fondamentale il ruolo delle competenze in questa continua evoluzione. Senza investimenti in capitale umano, infatti, anche le tecnologie ad oggi più avanzate rischiano di produrre effetti di esclusione e disoccupazione. Al contrario, in contesti dove i governi mirano a promuovere programmi di reskilling (riqualificazione) e upskilling (potenziamento delle competenze) le innovazioni tecnologico tendono a essere complementari al lavoro umano generando così un valore aggiunto. Negli ultimi anni, soprattutto in Europa, sono sempre di più i programmi volti a colmare il gap tra tecnologia e competenze. Le PMI italiane, per esempio, che non sempre sono in grado di investire ingenti somme nelle innovazioni tecnologiche per implementare l'automazione e la robotica su larga scala, si stanno orientando verso l'utilizzo di tecnologie intermedie, come sistemi IoT, piattaforme CRM ed ERP, che richiedono nuove competenze in termini di analisi dei dati,

capacità decisionali e autonomia. È proprio in questi contesti che il lavoratore assume un ruolo centrale e attivo nell'integrazione della tecnologia, trasformando il proprio lavoro in chiave strategica e rendendolo meno ripetitivo e più autonomo. La tecnologia non sostituisce il capitale umano, ma lo trasforma in un “operatore aumentato”, in grado di controllare, analizzare e ottimizzare i processi produttivi.

Anche il rapporto IMF del 2025 sottolinea come le imprese che hanno integrato sistemi di intelligenza artificiale all'interno dei processi aziendale con strategie di continua formazione e crescita dei lavoratori abbiano ottenuto degli incrementi di produttività ampi e una riduzione del turnover del personale significativo. Ciò, dimostra che, la tecnologia, se accompagnata da scelte strategiche efficaci, può rafforzare la relazione tra l'innovazione e l'occupazione. Tuttavia, la questione, oltre a essere tecnica ed economica, assume anche un ruolo etico e sociale. Il modo in cui le tecnologie vengono adottate all'interno dell'azione determina il livello di inclusività della trasformazione. Ad esempio, la crescente adozione dell'intelligenza artificiale in tutti i processi decisionali pone molti interrogativi sulla governance algoritmica, sulla trasparenza dei dati e sull'accountability dei sistemi automatici. A queste preoccupazioni si aggiunge quella ambientale, dato il notevole impatto energetico associato all'utilizzo di queste tecnologie e infrastrutture digitali. Nel 2025 infatti il Climate Neutral Data Centre Pact ha ribadito la necessità di garantire una transizione digitale che sia rispettosa dell'ambiente in cui viviamo, puntando all'utilizzo di soluzioni green e di adozione di sistemi a basso impatto ambientale e consumo energetico.

L'introduzione di queste nuove tecnologie sta creando una nuova frontiera nel mondo in cui le aziende concepiscono il lavoro. Piuttosto che soffermarsi su una visione binaria di sostituzione o complementarità, la vera opportunità si trova nel reinventare i processi decisionali favorendo la flessibilità organizzativa, e rendendo il lavoratore una risorsa importante che, grazie alla tecnologia, diviene più proattivo nelle decisioni quotidiane.

La sfida non è solo quella di integrare l'automazione nei processi esistenti, ma di sviluppare nuovi modelli di business che sappiano capitalizzare sull'interazione tra uomo e macchina, creando valore attraverso una collaborazione dinamica.

## **1.5 tecnologie emergenti: stampa 3D, robotica e sistemi intelligenti**

L'avvento dell'industria 4.0 ha portato al centro dell'attenzione una vasta gamma di tecnologie emergenti sviluppatesi negli ultimi anni e che stanno ridefinendo i modelli di produzione industriale andando ad apportare sostanziali modifiche all'organizzazione del lavoro. Tra queste, la stampa 3D (Additive Manufacturing), la robotica avanzata e l'integrazione di sistemi intelligenti basati sull'AI, machine learning e Internet of things (IoT) stanno contribuendo a generare una significativa trasformazione rispetto alle fasi precedenti dello sviluppo industriale. Tali tecnologie, non solo aumentano l'efficacia e la produttività dei processi, ma ristrutturano completamente le funzioni aziendali, creando nuove figure professionali e mettendo in discussione i ruoli più tradizionali. Un primo aspetto centrale è il cambiamento nella logica produttiva indotto dall'introduzione sul mercato della stampa 3D. A differenza infatti della tradizionale produzione, che parte da un materiale grezzo per rimuoverne parti fino ad ottenere il prodotto che si desidera, la stampa 3D permette la realizzazione additiva, costruendo oggetti strato per strato. Questa tecnologia, facilitando la personalizzazione di massa, la delocalizzazione della produzione e l'abbattimento delle barriere all'ingresso per le PMI, ha ridotto significativamente i costi marginali di produzione.

Dal punto di vista storico, la stampa 3D nasce negli anni Ottanta grazie a Charles Hull (1986), inventore della stereolitografia e fondatore di 3D Systems. Negli anni successivi si svilupparono molteplici tecniche come la sinterizzazione selettiva di polveri e la modellizzazione a deposizione fusa, fino ad arrivare al 1993, anno in cui il MIT sviluppò la prima stampante a 28 colori, aprendo così la strada alla possibilità di stampare oggetti policromatici. Dagli anni 2000 in poi iniziarono a diffondersi stampanti autoreplicanti a basso costo, e parallelamente, iniziarono a emergere comunità online e marketplace dedicati, favorendo la diffusione della tecnologia e lo scambio e la condivisione di modelli 3D. Questo ecosistema digitale ha reso la stampa 3D non solo una tecnologia, ma un vero e proprio fenomeno socioeconomico in grado di integrare produzione, progettazione e distribuzione.

Secondo l'analisi di Prytkova et al. (2024), le tecnologie additive come la stampa 3D sono caratterizzate da una bassa incidenza sull'occupazione complessiva ma da una trasformazione elevate delle categorie professionali richieste. Dunque, non si tratta di perdita netta di posti di lavoro, quanto piuttosto di una riqualificazione delle competenze richieste. Negli ultimi anni, il mercato europeo dell'Additive Manufacturing ha registrato una crescita significativa, con un valore dell'industria 3D stimato sui 680 milioni e una proiezione di crescita di circa il 7,8% annuo. Allo stesso tempo, il settore delle micro-stampanti 3D ha raggiunto un valore di 2,2 miliardi e punta a quintuplicarsi entro il 2033. Questi sono tutti indicatori chiari di una nuova tecnologia che sta crescendo in modo esponenziale diventando e assumendo un ruolo fondamentale per la produzione industriale italiana ed europea. Come evidenziato anche nel paper CESifo, la stampa 3D sta

trasformando completamente particolari settori ad alta intensità tecnologica come quello aerospaziale e medico, dove la produzione additiva, con un consumo ridotto e con costi contenuti, rende possibile lo sviluppo di strutture altamente complesse e personalizzate. Possiamo vedere, per esempio, come molte aziende, utilizzando questa tecnologia, hanno tratto numerosi vantaggi. Airbus è riuscita a ridurre il numero di parti su alcuni componenti da 248 ad una singola struttura stampata in 3D e costruita in titanio. GE Aviation ha realizzato delle filiere produttive ibride e resistenti, riducendo il numero di pezzi da 900 a 16. Startup come Alloyd, nel Regno Unito, stanno sperimentando, attraverso l'utilizzo della stampa 3D, nuove leghe metalliche avanzate per applicazioni in settore energetico e di difesa.

La stampa 3D è risultata fondamentale anche nella produzione on-demand: piattaforme cloud nel modello manufacturing as a service (MaaS) consentono alle PMI, senza investimenti significativi, di offrire servizi personalizzati di stampa 3D. Questo approccio permette inoltre di garantire una sostenibilità ambientale ed economica, riducendo gli sprechi, le emissioni e le scorte logistiche.

Per quanto riguarda i materiali, emergono innovazioni importanti: sono sempre più diffuse leghe di titanio e alluminio ad alte prestazioni e sono diventati fondamentali anche i materiali eco-compatibili come PLA, PHA, PBS, in linea con la diffusione dell'economia circolare e della tendenza RSC Publishing. L'adozione, infatti, di questi materiali sostenibili permette di creare prodotti con un minor impatto ambientale oltre a contrastare il tradizionale uso della plastica. A livello di sostenibilità la stampa 3D riduce notevolmente gli scarti rispetto ai metodi tradizionali: fino al 90% in meno di scarti di lavorazione e fino al 95% nell'edilizia, con conseguente riduzione del peso e di tutte le emissioni legate al trasporto di tali elementi. Altri studi inoltre dimostrano come, nel caso di parti complesse per il settore aeronautico, la stampa 3D può ridurre il consumo energetico tra il 4% e il 63% sul ciclo di vita dei prodotti. Un esempio è rappresentato da TECLA, un progetto italiano che ha realizzato un'abitazione utilizzando un impasto di terra locale e materiali naturali attraverso l'utilizzo della stampa 3D. Questo caso dimostra come l'Additive Manufacturing possa rivoluzionare i modelli costruttivi tradizionali, promuovendo al tempo stesso la sostenibilità ambientale e territoriale.

Accanto alle applicazioni tradizionali, emergono anche nuove sperimentazioni come la stampa 4D, che combina la 3D con materiali intelligenti capaci di modificare forma e funzione nel tempo in risposta a stimoli provenienti dall'esterno come calore o umidità. Sebbene la stampa 4D sia ancora in fase di sperimentazione, con numerosi ostacoli informatici da superare, è considerata una delle possibili evoluzioni future dell'additive manufacturing, attirando l'attenzione di grandi aziende e venture capital.

Dal punto di vista tecnico, il flusso di lavoro tipico della stampa 3D si articola in tre fasi principali: la modellazione digitale tramite software CAD, la preparazione dei file, e lo slicing, ossia la suddivisione del modello in vari strati che possano essere interpretati dalla stampante. I criteri di scelta della tecnologia più adatta includono il volume massimo stampabile, i costi e la velocità di stampa.

Dal punto di vista occupazionale la stampa 3D richiede delle competenze specifiche e complesse come progettazione CAD/CAM, gestione materiale, controllo qualità e manutenzione. Il progetto europeo SAM - Sector Skill Strategy in Additive Manufacturing ha identificato nuove figure professionali per l'utilizzo di queste nuove tecnologie segnando così la necessità di promuovere nuovi corsi di formazione. Diviene fondamentale il ruolo delle università, dei centri di ricerca e dei Digital Innovation Hubs per il trasferimento tecnologico e per la formazione delle figure professionali in grado di analizzare e dialogare con i nuovi sistemi intelligenti.

Un ulteriore campo di sperimentazione è rappresentato dall'integrazione della stampa 3D in settori non tradizionali, come quello della moda e dell'alimentazione. Nel primo settore, alcuni progetti hanno realizzato abiti e accessori stampati in 3D e personalizzati in base alle misure dei clienti. Nel settore alimentare, il cosiddetto food printing apre la strada a una personalizzazione alimentare destinata ad atleti, anziani o donne in gravidanza, sebbene i costi elevati ne limitino la diffusione. Questi esempi mostrano come l'additive manufacturing abbia un potenziale trasformativo che va ben oltre i settori industriali più avanzati.

In sintesi, la stampa 3D non rappresenta solo una nuova tecnologia dell'industria 4.0, ma diviene un pilastro fondamentale di questa transizione: capace di trasformare processi, organizzazioni, competenze e filiere pur mantenendo un chiaro legame con la sostenibilità ambientale.

La robotica industriale, invece, rappresenta una delle tecnologie che hanno un impatto maggiore e diretto sul lavoro manuale e ripetitivo. Mentre nei decenni precedenti la robotizzazione si concentrava per di più su operazioni rigide e programmabili (tipiche, ad esempio, del settore automotive), oggi i nuovi robot collaborativi che prendono il nome di "cobot" sono dotati di sensori, capacità adattive e intelligenza artificiale. Sono dunque, in grado di apprendere velocemente, di superare ostacoli, di modificare il proprio comportamento in base al contesto in cui operano. Questo tipo di tecnologia crea uno scenario ambivalente, da un lato infatti riduce il lavoro fisico, pesante e pericoloso, dall'altro espone, come già in precedenza, al rischio di sostituzione dei lavoratori con mansioni semplici e ripetitive. L'impatto occupazionale della robotica varia a seconda dei settori in cui viene utilizzata. In ambito manifatturiero, lo studio di Dauth et al. (2021) sul mercato tedesco dimostra come i robot abbiano effettivamente ridotto drasticamente la domanda

di manodopera operaia, generando al contempo maggiori posti di lavoro nei settori della manutenzione, della logistica, e della programmazione. Questo effetto di compensazione viene confermato anche da Acemoglu e Restrepo, i quali sottolineano come l'integrazione dei robot nelle smart factories generi una riallocazione delle competenze piuttosto che una sostituzione netta dei lavoratori. Al giorno d'oggi, nel 2025, i dati presi dall'IFR (international Federation of Robotics) mostrano che l'Europa ad oggi è la seconda area per densità robotica (numero di robot ogni 10.000 lavoratori), con la Germania e l'Italia tra i primi 5 paesi. In Italia, grazie al Piano Transizione 5.0, approvato nel 2024, è cresciuta ulteriormente l'adozione di tecnologie robotiche attraverso crediti d'imposta e investimenti in formazione tecnica e umana. Tuttavia, nonostante ci siano moltissimi programmi volti ad aiutare le imprese non ancora in grado di permettersi ingenti investimenti per queste nuove tecnologie, il divario tra le grandi imprese e le PMI risulta sempre più eterogeneo: mentre le prime adottano robot avanzati, le seconde tendono a digitalizzare i processi gradualmente attraverso l'utilizzo di macchinari semi-automatici e strumenti connessi all'IoT.

Accanto alla stampa 3D e alla robotica, si collocano, sviluppatasi negli ultimi anni, la produzione di sistemi intelligenti, ovvero piattaforme digitali in grado di raccogliere una grande quantità di dati in tempo reale, elaborarli attraverso modelli predittivi e ottimizzare i processi industriali in maniera autonoma. Si parla dunque di sistemi cyber/fisici che combinano elementi meccanici con software di ultima generazione creando un'interfaccia uomo-macchina. Queste tecnologie, integrate nelle smart factories, non solo permettono di aumentare l'efficienza operativa ma modificano il concetto di organizzazione del lavoro, trasformando la produzione sequenziale e gerarchica in una logica integrata, flessibile e decentralizzata.

Il paper CESifo mette in luce come tali tecnologie di machine learning, natural language e visione artificiale vengano applicate anche nei settori manifatturieri leggeri, modificando così l'interazione tra lavoratori e macchine. Ad esempio, nei reparti di ispezione qualità, l'intelligenza artificiale grazie alle sue capacità è in grado di cogliere aspetti ed individuare difetti invisibili all'occhio umano; negli impianti logistici, può ottimizzare in tempo reale il flusso dei materiali ed è in grado, nelle linee di assemblaggio, di adattare le fasi produttive in base alla domanda. Nel 2025, uno studio della European Technology Observatory ha evidenziato come circa il 60% delle aziende manifatturiere in Europa, con più di 250 dipendenti, abbia integrato almeno un tipo di intelligenza artificiale nei propri processi produttivi. Tuttavia, bisogna sottolineare, che solo il 28% ha implementato l'integrazione con corsi di formazione per i propri dipendenti, facendo crescere così un divario tra adozione tecnologica e capitale umano.

Un altro studio del 2025 condotto dal World Manufacturing Forum (WMF) ha evidenziato come le imprese che sono state in grado di adottare le tecnologie emergenti in modo integrato (ad esempio combinando stampa 3D, AI e software) hanno registrato un incremento della produttività del 21% e una maggiore stabilità occupazionale, ma anche un maggiore turnover nelle posizioni tradizionali. Questi dati suggeriscono che non è l'adozione tecnologica in sé a determinare effetti negativi sull'occupazione, bensì sono le modalità con cui essa viene implementata.

In prospettiva, le tecnologie emergenti non saranno rilevanti soltanto per l'efficienza dei processi produttivi o per l'impatto sull'occupazione, ma per la loro capacità di ridefinire i modelli di filiera e di mercato. La stampa 3D, la robotica e i sistemi intelligenti, aprono la strada a una produzione più distribuita e locale, in cui i confini tra fornitori e produttori diventano più labili, consentendo alle imprese di operare in reti globali altamente connesse. Questo permette, non solo di ridurre i costi e i tempi, ma anche di cambiare l'intera catena del valore, rendendola più sostenibile e resiliente. Le smart factories diventano così non soltanto dei luoghi di innovazione tecnologica, ma veri e propri hub strategici, capaci di reagire rapidamente a eventi esterni, dalle interruzioni nelle forniture alle emergenze ambientali, trasformando l'adozione delle tecnologie emergenti in un vantaggio competitivo.

## **1.6 L'impatto settoriale e demografico delle tecnologie: genere, età e skill**

La transizione verso l'industria 4.0 e l'adozione su larga scala delle tecnologie emergenti citate fino ad ora, producono effetti eterogenei tra i settori produttivi e tra le categorie demografiche della forza lavoro. Diversi studi sottolineano come impatto occupazionale e organizzativo della trasformazione digitale sia variabile a seconda del tipo di industria, del livello di qualifica e di formazione, del genere e dell'età. Abbiamo già visto come a livello settoriale, tali tecnologie colpiscono maggiormente i settori caratterizzati da mansioni ripetitive e manuali, come per esempio il settore manifatturiero. In particolare, settori come quello automobilistico, elettronico, tessile e della logistica, sono più esposti e influenzati dall'adozione della tecnologia con una maggiore minaccia alla sostituzione del lavoro umano. D'altro canto, settori come l'artigianato avanzato, l'edilizia, la sanità, l'industria digitale, mostrano una maggiore capacità di adattamento della tecnologia in chiave complementare, generando una domanda di nuove competenze e nuove professioni.

Dal punto di vista demografico emerge con chiarezza un divario generazionale nell'adattamento tecnologico. I lavoratori più anziani (over 55), spesso, essendo meno digitalizzati e con meno competenze, risultano più esposti al rischio di sostituzione e di obsolescenza delle competenze. Secondo l'indice TechXposure (Prytkova et al., 2024), l'esposizione alle tecnologie emergenti è massima tra quei lavoratori con competenze specifiche e informatiche acquisite nell'ultimo decennio, mentre decresce fortemente nelle categorie più anziane. Tuttavia, alcune politiche adottate in Europa di upskilling hanno dimostrato dei risultati promettenti, evidenziando come grazie a programmi di formazione digitale dei lavoratori maturi, sia cresciuto il livello e le competenze informatiche. Più sorprendente invece è l'impatto che queste tecnologie hanno sul genere. La letteratura recente e gli studi condotti negli ultimi anni contrastano la tradizionale narrativa secondo cui la tecnologia penalizzerebbe maggiormente le donne. I dati raccolti mostrano come nel contesto attuale europeo, le donne, essendo coinvolte maggiormente in settori ad alta intensità cognitiva come sanità, educazione e servizi alla persona, risultano essere meno esposte, rispetto agli uomini, a lavori a rischio di automazione e dunque sostitutivi. Inoltre, le donne risultano essere sovrarappresentate in ambiti come il project management, la comunicazione, e i servizi amministrativi, dove l'intelligenza artificiale e le tecnologie digitali assumono un ruolo abilitante ed efficace. Tuttavia, il divario di genere non è ancora stato del tutto superato. Vediamo come le donne, infatti, risultano essere ancora sottorappresentate in tutti quegli ambiti fondamentali per la nuova transizione tecnologica, ad alto livello digitale, come la robotica, la cybersecurity, e nello sviluppo di software. Uno studio pubblicato nell'ultimo anno dal World Economic Forum evidenzia come solo il 24% dei lavoratori impiegati in posizioni a stretto contatto con l'utilizzo dell'AI in Europa sono donne, con la percentuale che scende al 17% per tutte le posizioni dirigenziali nei settori digitali. Questo netto divario è riconducibile ad una diversa formazione, che inizia già nei percorsi scolastici e universitari, con una netta riduzione delle iscrizioni femminili in corsi a contenuto tecnologico rispetto alle iscrizioni maschili. Infine, la letteratura empirica recente ha dedicato crescente attenzione agli effetti sociali della transizione su giovani e anziani. I giovani, per esempio, pur essendo maggiormente digitalizzati e competenti, incontrano spesso barriere all'ingresso legate alla mancanza di esperienza nel settore lavorativo, mentre i lavoratori maturi pur avendo esperienze rimangono esposti a rischi di obsolescenza delle competenze.

Per quanto riguarda le competenze, la digitalizzazione ha accelerato un processo già in corso di trasformazione e ristrutturazione del capitale umano. In questa transizione i lavoratori con alte competenze analitiche, creative e di problem solving risultano favoriti a discapito di tutti quelli che svolgono compiti standardizzabili e ripetitivi. Il JRC Technical Report 2025 della Commissione UE ha rilevato un incremento della dualizzazione del mercato europeo industriale: da un lato, lavoratori

altamente qualificati e digitalizzati, spesso ben retribuiti, dall’altro invece i lavoratori con meno qualifiche e con una formazione più obsoleta rimangono soggetti a precarietà crescente. Lo stesso concetto di job polarization, di cui già si è discusso nei paragrafi precedenti, si manifesta a livello demografico e settoriale, andando ad incrementare tali diseguaglianze.

L’accessibilità è l’inclusione nella formazione digitale dei lavoratori sono le principali sfide per garantire una transizione tecnologica equa. Uno studio condotto nel 2025 dall’OECD, infatti, evidenzia come il 32% dei lavoratori non possieda le competenze tecniche digitali necessarie per le nuove professioni e che circa il 58% dei lavoratori medi non abbia la possibilità di accedere a corsi di formazione e programmi di aggiornamento professionale. Alcuni paesi, come la Danimarca e l’Estonia, hanno avviato una serie di programmi pubblici obbligatori di digital reskilling attraverso fondi europei destinati a lavoratori disoccupati o a rischio tecnologico, registrando così riduzioni significative del divario tra generazioni e di genere.

Un ultimo aspetto da tenere in considerazione è la differenza geografica. Le regioni, infatti, più industrializzate e urbanizzate sono più esposte al rischio di sostituzione nei vari settori, ma sono generalmente te più pronte ad assorbire ed affrontare tecnologie più complesse. Le regioni rurali, invece, sono meno esposte a tali rischi, ma mostrano un netto ritardo nell’adozione delle nuove tecnologie. In Italia, ad esempio, vi è una netta distinzione in termini di accesso alle tecnologie tra Nord e Sud: mentre infatti le regioni più a nord guidano l’adozione di tecnologie digitali, quelle più a sud risultano essere in ritardo sia a livello di infrastrutture che di formazione tecnica, incrementando così il divario tra opportunità e sviluppo.

Dunque, l’impatto delle nuove tecnologie non riguarda soltanto la dimensione economica o occupazionale, ma tocca anche la sfera culturale del lavoro. Non si tratta quindi solo di valutare quante posizioni verranno sostituite o trasformate, ma di comprendere come cambierà il modo in cui i lavoratori percepiscono il proprio ruolo e il valore sociale del loro contributo.

## 1.7 Le sfide delle politiche industriali, educative e territoriali

All’interno della trasformazione apportata dall’industria 4.0, le politiche pubbliche, industriali e formative assumono un ruolo centrale. Le tecnologie digitali e intelligenti non generano effetti neutri né predeterminati, bensì, operano in un contesto istituzionale, sociale ed economico che ne plasma i risultati. Lo studio di Prytkova et al. (2024) e numerose altre ricerche hanno evidenziato

che non intercorre univocità nella relazione tra innovazione tecnologica e occupazione. Infatti, l'intelligenza artificiale e i robot hanno la capacità di sostituire o esclusivamente assumere un ruolo complementare all'attività umana. L'uno o l'altro ruolo dipendono dalla politica adottata per amministrarne l'uso. Perciò, è necessario che gli sforzi pubblici siano coordinati al fine di evitare l'aumento di diseguaglianze e frammentazione territoriale. Lo scopo delle politiche industriali è quello di generare uno schema produttivo competitivo ed inclusivo, in modo sostenibile nel tempo.

A supporto di questa fase trasformativa, l'Unione Europea ha dato il via ad iniziative importanti negli ultimi tempi. Horizon Europe si è affermato nel 2021 come un programma cardine in tal senso che ha stanziato oltre 95 miliardi di euro per il progresso nella ricerca delle tecnologie avanzate (come robotica, intelligenza artificiale e stampa 3D). Allo stesso modo, anche il programma Digital Europe supporta le aziende nella fase di adozione delle infrastrutture tecnologiche più avanzate. A tal riguardo, è rilevante menzionare anche un ulteriore strumento di supporto appositamente creato per agevolare la transizione nelle PMI. Si tratta di strutture digitali volte a sostenere l'implementazione di sistemi di intelligenza artificiale nelle PMI, particolarmente nel settore manifatturiero e nei settori industriali tradizionali ad elevato rischio tecnologico. È pur vero che l'efficacia di queste soluzioni dipende strettamente dalla capacità della forza lavoro di interagire e cooperare con esse. In quest'ottica, risulta essenziale la formazione del personale.

Questa necessità di instaurare una corretta cooperazione e formazione del personale umano con le macchine, riporta al legame indissolubile tra politica industriale e politica educativa. L'evoluzione sperimentata nel mondo del lavoro comporta una riformulazione necessaria dei sistemi educativi. Se prima era centrale la formazione di nuovi profili tecnici, oggi, ciò che assume priorità è l'apprendimento continuo (lifelong learning) per condividere le nuove abilità richieste. L'adeguamento dei programmi scolastici ed universitari risulta fondamentale per promuovere le nuove skill trasversali richieste. L'implementazione delle nuove infrastrutture tecnologiche senza una strategia definita di upskilling e reskilling comportano uno sfruttamento depotenziato dei sistemi intelligenti. Come asserito dal World Economic Forum, oltre il 40% della forza lavoro dovrà riqualificare il proprio bagaglio di competenze digitali entro il 2027. Questo, nella prospettiva di preservare la competitività sul mercato.

Con l'obiettivo di raggiungere cinque milioni di cittadini europei con competenze digitali avanzate, la Commissione Europea ha lanciato l'iniziativa AI Talent Ready nel 2025. Questo, in risposta alle esigenze di contribuire alla formazione avanzata in materia di intelligenza artificiale nell'ambito industriale.

Ancora, le misure adottate a livello europeo hanno preso in carico il compito di diminuire il divario esistente in Italia tra nord e sud per l'adozione delle tecnologie 4.0. Secondo il Digital Transformation Index 2025, questa spaccatura si è inasprita nonostante gli interventi delle istituzioni. Perciò, l'Unione Europea ha intensificato il Just Transition Mechanism, un fondo volto ad aiutare le regioni maggiormente assoggettate al rischio di disoccupazione tecnologica e alle trasformazioni produttive. L'erogazione di questo intervento ha un potenziale di efficacia considerevole ma questo varia anche in funzione della governance e delle strategie applicative a livello territoriale.

Altro aspetto fondamentale della transizione è la dimensione normativa. L'introduzione nel mercato e nei processi di sistemi decisionali, intelligenza artificiale e algoritmi predittivi solleva questioni importanti riguardo la privacy di dati, la responsabilità, la trasparenza e i diritti dei lavoratori. Entrato in vigore nel 2024, il regolamento europeo sull'intelligenza artificiale (AI ACT) mira a definire un quadro etico e responsabile per l'uso di tali tecnologie. Viene infatti introdotta la categoria di "sistemi ad alto rischio" la quale pone un'attenzione maggiore sull'utilizzo delle tecnologie, nascono dei nuovi obblighi per le imprese al fine di garantire la tracciabilità e la trasparenza delle informazioni e viene considerato l'impatto ambientale ed etico sui vari settori. Tuttavia, se da un lato l'AI ACT mira a promuovere un utilizzo più sostenibile e trasparente, dall'altro diviene una sfida per molte PMI che potrebbero non disporre del capitale necessario, delle competenze e delle risorse per adeguarsi a standard così elevati. Anche per questo motivo nascono gli "AI Compliance Hubs", dei centri regionali di assistenza tecnica al supporto del regolamento all'interno delle imprese.

Sappiamo inoltre che sebbene le tecnologie avanzate consentano di ridurre gli sprechi e di migliorare l'efficienza energetica nei vari processi industriali, esse comportano un elevato aumento della domanda di risorse digitali ed elettriche. Negli ultimi anni, infatti, i data center per lo sviluppo dei flussi informativi sono in forte espansione e secondo il JRC Technical Report (2025), potrebbero arrivare a consumare più del 5% dell'elettricità europea alla fine del 2030. Il Climate Neutral Data Centre Pact, al fine di garantire una maggiore sostenibilità, ha introdotto nuovi standard per la gestione delle infrastrutture digitali, ma serviranno degli investimenti corposi per metterli in atto, rendendo fondamentale il coordinamento tra politiche industriali, ambientali e tecnologiche.

Le politiche pubbliche, dunque, devono assumere un ruolo redistributivo, garantendo uno sviluppo sostenibile ed efficace anche a quei territori più fragili e con una minor possibilità di accesso alle nuove tecnologie, attraverso strumenti differenziati e coerenti. Solo un approccio multilivello è coeso può rendere la rivoluzione digitale una vera opportunità per tutti.

## 1.8 Sintesi critica e spazi di ricerca aperti

Il percorso analizzato fino ad ora in questo capitolo ha messo in luce come le tecnologie emergenti, tra cui robotica, stampa 3D e intelligenza artificiale, stiano trasformando completamente la produzione manifatturiera e le competenze richieste nel mercato attuale. La letteratura converge con sempre più insistenza sull'idea che gli effetti dell'ultima rivoluzione 4.0 non siano deterministicamente determinati, ma dipendano dalle politiche di accompagnamento, dal contesto istituzionale e dalle modalità di adozione. Le stesse tecnologie, infatti, possono avere diversi effetti a seconda delle capacità delle imprese di integrarle in modo appropriato e complementare alle competenze umane.

Tuttavia, ci sono ancora dei limiti ben visibili. Molti studi, infatti, si concentrano solo su analisi aggregate, trascurando così le differenze settoriali e territoriali che caratterizzano tutta l'Europa. Nonostante l'UE disponga di indicatori consolidati come il DESI (Digital Economy and Society Index), in grado di misurare il livello di digitalizzazione e le competenze digitali della popolazione, la letteratura si limita spesso a descrivere tendenze generali senza approfondire i divari concreti tra i vari strati membri dell'Unione Europea. Ciò rende difficile comprendere come le differenze strutturali, nell'adozione di robotica e stampa 3D, nelle infrastrutture digitali e nella formazione, vadano ad incidere realmente sulla capacità competitiva dei diversi sistemi produttivi.

Alla luce di quest'ultime considerazioni, lo spazio per la ricerca futura non si concentrerà soltanto sull'evidenziare l'effetto degli impatti tecnologici sul territorio, ma anche sull'esigenza di analizzare con maggior attenzione le differenze di adozione e di competenze digitali all'interno dell'Europa. Proprio su questo si concentrerà il capitolo successivo che, attraverso l'utilizzo di dati comparativi (DESI, IFR, Eurostat), si focalizzerà sul ruolo dell'automazione e delle nuove tecnologie digitali nel manifatturiero europeo, mettendo in luce come la transizione digitale non sia per niente uniforme ma caratterizzata da profonde diseguaglianze geografiche, settoriali, e demografiche.

## Capitolo 2 – Implicazioni e prospettive per il lavoro manifatturiero europeo nell'era digitale

## 2.1 Introduzione: dal quadro teorico ai dati comparativi

Dal capitolo precedente si evince come la cosiddetta “quarta rivoluzione industriale” stia apportando modifiche sostanziali alle strutture produttive europee, con effetti che non possono essere considerati univoci. Le stesse tecnologie possono produrre esiti diversi a seconda delle modalità di adozione e del contesto. Proprio da questa constatazione nasce l’esigenza di spostare l’attenzione, in questo secondo capitolo, da un’analisi prevalentemente teorica a una ricostruzione comparativa basata su dati empirici, capace di dimostrare in modo chiaro i divari presenti sul mercato europeo causati dalla transizione digitale.

Per comprendere al meglio la portata e l’eterogeneità di questo processo, è necessario introdurre innanzitutto degli strumenti di misurazione in grado di monitorare il livello di digitalizzazione dei Paesi membri e correlare tali informazioni con la capacità del settore manifatturiero di adottare le innovazioni tecnologiche più avanzate.

Un punto di riferimento essenziale è rappresentato dal Digital Economy and Society Index (DESI). Elaborato annualmente fino al 2022 dalla Commissione europea, poi confluito nella “Digital Decade Policy Programme 2030”, tale indice sintetizza la performance digitale dei paesi membri, permettendo di osservare come le infrastrutture tecnologiche, le competenze, e le politiche pubbliche interagiscano tra di loro nel creare un livello di digitalizzazione nazionale.

Secondo il DESI 2022, ultima edizione ufficiale con questa denominazione, la transizione non risulta affatto uniforme. I dati disponibili dal 2023 in poi, attraverso il monitoraggio del nuovo programma Digital Decade 2030, confermano che i Paesi nordici si trovano nelle prime posizioni, segnalando così un livello avanzato sia sul piano delle infrastrutture che su quello delle competenze digitali. L’Italia, pur avendo registrato progressi, rimane al di sotto della media europea, soprattutto se guardiamo al fronte delle competenze digitali. Questi dati evidenziano come la dimensione delle competenze rappresenti un punto significativo per comprendere la posizione dell’Italia rispetto agli altri Paesi.

L’utilizzo del DESI (e, a partire dal 2023, dei nuovi indicatori della Digital Decade), integrato con le statistiche di Eurostat, con i dati della International Federation of Robotics (IFR) e con report specialistici come il Wohlers Report o le analisi del Joint Research Centre (JRC) della Commissione europea, permetterà di creare un quadro articolato andando a documentare le differenze esistenti tra i vari Paesi e mettendo in evidenza i modelli più avanzati e i ritardi persistenti.

In questo senso, dunque, il capitolo cercherà di creare un ponte tra la cornice teorica discussa nel capitolo precedente e l’analisi critica dei casi e delle prospettive che saranno affrontate più avanti.

## **2.2 Il Digital Economy and Society Index (DESI) e gli strumenti di misurazione della transizione digitale**

Per analizzare in profondità gli effetti della transizione digitale europea risulta indispensabile servirsi di strumenti comparativi che permettano di misurare il grado di digitalizzazione dei diversi Paesi e di collegarlo con variabili economiche, sociali e produttive. Tra questi, il già citato DESI, si è affermato nel tempo come la metrica più completa e riconosciuta a livello europeo. Elaborato per la prima volta dalla Commissione Europea nel 2014, Il DESI ha fornito fino al 2022 un rapporto annuale autonomo, articolato lungo quattro dimensioni cardine: la connettività, il capitale umano, l'integrazione delle tecnologie digitali nelle imprese e i servizi pubblici digitali (DESI 2022 Report, Commissione Europea).

Dal 2023, in un'ottica di maggiore coerenza con la programmazione strategica dell'Unione Europea, il DESI non viene più pubblicato come un documento separato, ma è confluito nello strumento di monitoraggio della Digital Decade Policy Programme 2030, che raccoglie numerosi indicatori finalizzati a valutare i progressi verso i target fissati al 2030 (Digital Decade Country Report, Commissione Europea, 2024). Tale passaggio rappresenta non solo la volontà di aggiornare la misurazione continuamente, ma va anche a rafforzare il legame tra dati e politiche.

Le quattro dimensioni che compongono il DESI permettono di cogliere con chiarezza la natura multidimensionale della transizione digitale in Europa. Ognuna delle quattro dimensioni evidenza divari interni ed esterni all'Unione, mettendo in luce i punti di forza e le criticità strutturali che impattano direttamente sulla competitività dei sistemi produttivi e sulla coesione sociale.

La prima dimensione è la connettività. Essa misura la disponibilità e l'accessibilità delle reti a banda larga, sia mobile che fissa, con maggiore attenzione alla diffusione delle reti a capacità molto elevata (VHCN) e alla copertura del 5G. La capacità di un Paese di garantire un alto livello di connettività, diffuso e affidabile, è il prerequisito fondamentale di qualsiasi trasformazione digitale, in quanto rende possibile l'adozione di soluzioni all'avanguardia come la manutenzione predittiva, l'Internet of Things (IoT), la logistica intelligente e la stampa 3D. La mancanza di una forte rete di connettività rende queste tecnologie più viste e più difficili da integrare su larga scala. I dati più recenti mettono in evidenza una forte spaccatura: paesi come la Danimarca, la Spagna e i Paesi Bassi nel 2022 avevano già raggiunto livelli di copertura VHCN superiori al 90%, a differenza di altri come la Grecia e l'Italia che restavano a livelli inferiori al 50%. Queste differenze si riflettono direttamente sulla competitività: all'interno dei mercati tedeschi e olandesi, la possibilità di gestire

macchinari connessi in tempo reale è ormai cosa certa, a differenza di molte aree italiane o del mercato greco in cui le imprese devono fare i conti con infrastrutture insufficienti e reti non affidabili.

La seconda dimensione, il capitale umano, rappresenta la capacità della popolazione della forza lavoro di utilizzare in modo competente strumenti e applicazioni digitali.

Questa dimensione non si limita esclusivamente a valutare il livello informatico di base, ma include anche la presenza di specialisti ICT, la quota di laureati in discipline informatiche e la partecipazione delle donne al settore tecnologico. Le differenze qui risultano ancora più marcate tra i vari paesi. Nel 2023, solo il 46% della popolazione italiana tra i 16 e i 74 anni possedeva competenze digitali di base, contro il 55,6% della media europea (Digital Decade Country Report Italia, 2024). Il ritardo appare ancora più grave quando si considerano le competenze avanzate, dove l'Italia si ferma appena al 23% contro il 26% dell'Unione Europea. Questo deficit di capitale umano qualificato ha conseguenze dirette sulla capacità delle imprese italiane di integrare e assorbire tecnologie avanzate. Non è un caso che nel 2024 solo l'8% delle imprese italiane dichiarasse di utilizzare applicazioni di intelligenza artificiale, a fronte del 20% in Germania e di oltre il 25% nei Paesi nordici (Istat 2024; Eurostat 2024).

In contesti dove la forza lavoro dispone di competenze digitali diffuse e avanzate, l'adozione di strumenti intelligenti come AI, big data e cloud risulta molto più agevolata, viceversa, laddove la formazione digitale risulta carente, le stesse tecnologie rimangono confinate solo per poche imprese di grandi dimensioni. La dimensione del capitale umano, dunque, rappresenta non soltanto un indicatore di equità sociale, ma anche un vero e proprio fattore produttivo in grado di determinare il posizionamento competitivo di un paese nel contesto europeo e globale.

La terza dimensione del DESI, l'integrazione delle tecnologie digitali nelle imprese, misura il grado di penetrazione nei mercati e nelle imprese di strumenti come intelligenza artificiale, e-commerce e cloud computing. Anche in questo caso le differenze tra Stati membri sono significative. La Germania, pur non primeggiando sulla connettività rispetto ai Paesi nordici, si distingue per la forte capacità delle imprese di assorbire e adottare innovazioni tecnologiche: nel 2024 infatti circa il 20% delle aziende tedesche dichiarava di aver implementato almeno una tecnologia di intelligenza artificiale (Eurostat 2024).

L'Italia, come già detto in precedenza, è molto più indietro, con appena l'8% delle imprese, in gran parte grandi aziende e multinazionali. Il divario si ripropone anche nell'uso del cloud computing: se

in Svezia e in Finlandia moltre il 70% delle imprese utilizza servizi cloud, in Italia la quota resta al di sotto del 40% (Eurostat 2023). A questo si aggiunge una differenza di tipo qualitativo: nei paesi nordici e in Germania il cloud viene utilizzato per applicazioni complesse come database, analytics, ERP, a differenza dell'Italia in cui prevale ancora un uso di servizi di base come archiviazione file e posta elettronica.

La quarta dimensione, ossia i servizi pubblici digitali, rappresenta la capacità delle Pubbliche amministrazioni di offrire servizi online efficienti e facilmente accessibili dalle imprese e dai cittadini. L'Italia, in questo campo, ha compiuto progressi significativi negli ultimi anni grazie agli investimenti del PNRR e allo sviluppo di piattaforme specializzate come PagoPa, appIO e ANPR (Anagrafe Nazionale della Popolazione Residente). Questi strumenti, dunque, hanno reso più facile il rapporto con la pubblica amministrazione contribuendo a diminuire il divario con gli altri Stati. Tuttavia, i dati del Digital Decade Country Report Italia 2024 mostrano come il gap non sia stato ancora superato: l'Italia, infatti, nel 2023 mostrava un punteggio di 68,3 nei servizi rivolti ai cittadini, contro una media dell'Unione europea pari a 79,4, e, nei servizi per le imprese un punteggio di 77,3 contro un valore medio europeo di 85,4. Anche in questo campo, dunque, possiamo vedere come l'Italia si trovi in una posizione intermedia: da un lato ci sono progressi tangibili, dall'altro questi progressi sono ben lontani dai leader europei come Estonia e Danimarca, dove i servizi pubblici digitali raggiungono livelli di eccellenza riconosciuti in tutto il mondo.

Nel loro insieme, queste quattro dimensioni mostrano come la trasformazione digitale in Europa non possa essere rappresentata unicamente da un indicatore di performance, ma debba essere interpretata come un insieme di competenze, infrastrutture, organizzazioni e istituzioni pubbliche.

L'Italia, in particolare, appare come un caso emblematico di sviluppo asimmetrico: forti ritardi in connettività, capitale umano e servizi pubblici digitali si intrecciano con eccellenze industriali e settoriali nell'integrazione delle tecnologie. Questa complessità spiega perché i punteggi DESI italiani si collocano stabilmente al di sotto della media Europea, nonostante la presenza di punte all'avanguardia che collocano il Paese tra i leader in specifici ambiti produttivi.

## **Differenze tra Paesi europei**

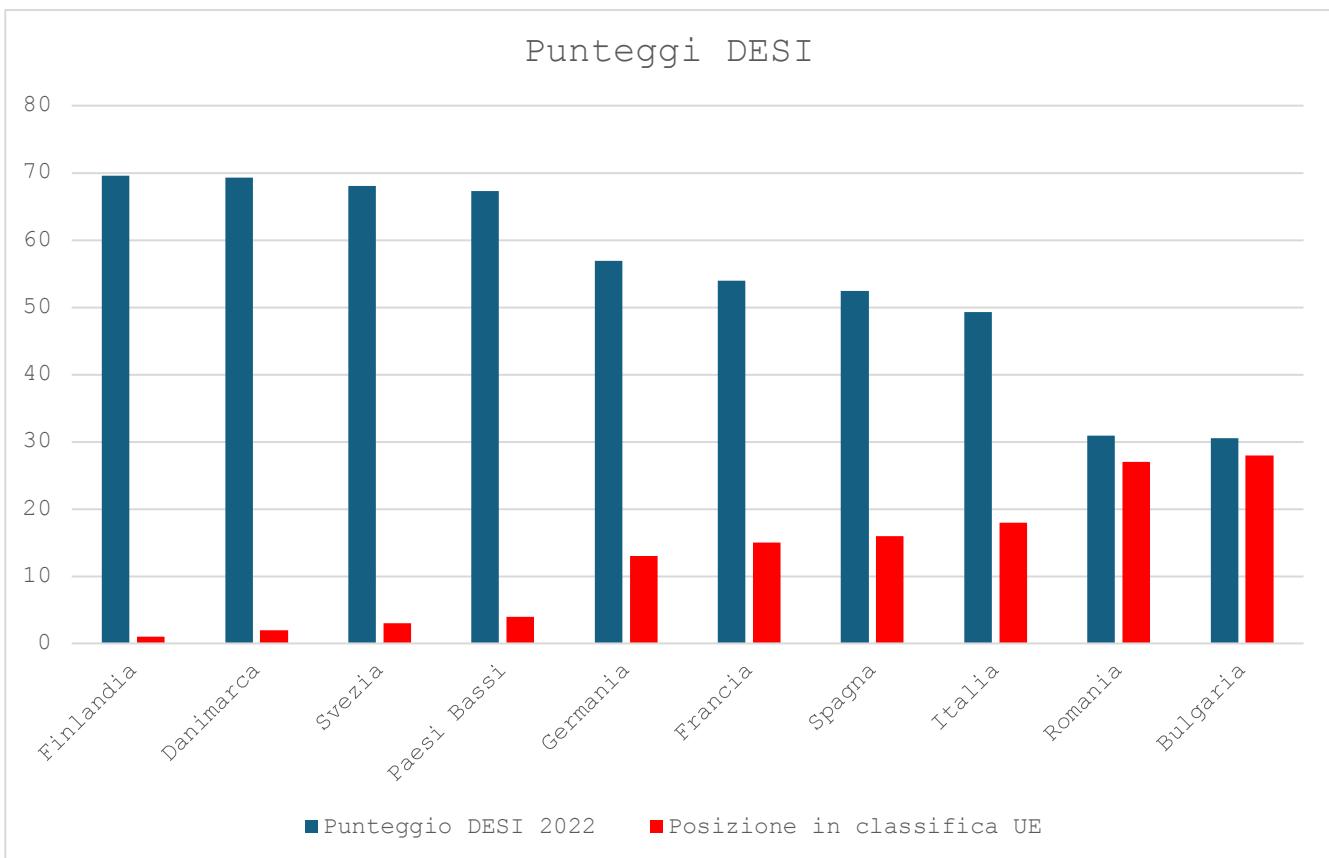


Figura 2.1: Punteggi DESI 2022

Fonte: Commissione Europea, *Digital Economy and Society Index (DESI) 2022-Full European Analysis*

La tabella 2.1 mostra chiaramente l'esistenza di un'Europa a due velocità. Paesi nordici come la Finlandia, la Danimarca e la Svezia guidano la classifica del 2022 con punteggi vicini a 70 su 100. Seguono Paesi Bassi e Germania, caratterizzati da forti investimenti nelle competenze e a livello di infrastrutture. All'estremo opposto si collocano Paesi dell'Est e del Sud Europa, come Romania, Bulgaria e Italia, con valori compresi tra 30 e 50 (DESI 2022 Report, Commissione Europea). Questa polarizzazione poi si riflette anche sullo sviluppo industriale: non è un caso, infatti, che le economie leader del DESI siano anche quelle che mostrano un'adozione e un'automazione più rapide e avanzate (IFR, World Robotics Report 2024).

Un confronto tra Italia e Germania è emblematico. Mentre il punteggio complessivo DESI del 2022 per l'Italia era 49,3, la Germania arrivava a 56,9; marcando una differenza sostanziale nelle singole dimensioni. Nella connettività, infatti, la Germania aveva raggiunto una copertura VHCN superiore al 70%, contro il 44% italiano; nel capitale umano, il 65% della popolazione tedesca possedeva competenze digitali di base, venti punti in più rispetto agli italiani (DESI 2022 Report,

Commissione Europea). Francia e Spagna, pur avendo valori intermedi, si collocano sistematicamente al di sopra dell'Italia in quasi tutte le dimensioni, segnalando che i ritardi italiani non sono solo nei confronti del Nord Europa ma anche dei principali partner mediterranei.

Accanto al DESI, esistono altri strumenti più specifici volti ad affinare l'analisi e cogliere aspetti più specifici, soprattutto in relazione al settore manifatturiero e ai processi di adozione delle tecnologie 4.0. Questi strumenti, dunque, rispondono all'esigenza di superare i limiti intrinseci del DESI, che pur offrendo una panoramica sistematica, tende spesso a rimanere su un livello troppo aggregato per descrivere le differenze settoriali e territoriali che caratterizzano l'Europa.

Un primo strumento fondamentale è rappresentato dai dati della International Federation of Robotics (IFR), che ogni anno pubblica il World Robotics Report. Questo rapporto è considerato la fonte più autorevole a livello globale per analizzare la robotica industriale, in quanto fornisce dati comparativi dettagliati sulla densità robotica di paesi e settori. Secondo l'ultima edizione del 2024, l'Europa ha registrato una crescita significativa nelle installazioni di robot industriali. La Germania e l'Italia risultano essere due paesi leader del settore, seguite poi da Spagna e Francia, con specializzazioni settoriali che rafforzano la competitività del manifatturiero. I dati IFR consentono dunque di integrare la prospettiva del DESI con la dimensione della robotica industriale, cruciale per il settore manifatturiero, e che costituisce uno degli indicatori più concreti dell'avanzamento tecnologico delle imprese.

Un secondo riferimento indispensabile per l'analisi è offerto da Eurostat, che mette a disposizione dataset comparabili a livello europeo. Rispetto al DESI, che sintetizza i dati di indici composti, Eurostat permette di analizzare con maggiore attenzione aspetti specifici come l'adozione dell'ICT nelle imprese, la diffusione del cloud computing e dell'intelligenza artificiale, l'utilizzo di big data analytics, ma anche le differenze demografiche e territoriali nelle competenze digitali della popolazione. Ad esempio, i dati Eurostat mostrano come nel 2023 l'adozione del cloud abbia superato il 70% in paesi come la Finlandia e la Svezia, nel 2024 oltre il 25% delle imprese nei paesi nordici dichiarava di utilizzare tecnologie di intelligenza artificiale, contro appena l'8% delle imprese italiane. L'utilizzo di questi dataset consente dunque di rappresentare comparazioni più raffinate, capaci di evidenziare i divari che esistono all'interno del contesto europeo.

Un terzo strumento che arricchisce il quadro è il Wohlers Report, pubblicato annualmente e focalizzato sul mercato globale della stampa 3D e dell'additive manufacturing. La differenza principale con il DESI e l'Eurostat sta nel fatto che, mentre i primi due database offrono dati di natura macro-trasversale, il Wohlers Report si concentra su un settore specifico, fornendo dati dettagliati sugli investimenti, sulla distribuzione geografica delle tecnologie e sulle applicazioni

industriali. L'edizione 2024, ad esempio, stima che il mercato europeo dell'additive manufacturing abbia raggiunto i 5,5 miliardi di dollari nell'anno precedente, con una proiezione di oltre i 7 miliardi entro il 2039, con una crescita sempre più marcata e con applicazioni consolidate in settori ad alto valore aggiunto come l'aerospaziale, il medicale e l'automotive (Wohlers Report). In termini di politiche industriali e di valutazione degli impatti sulla competitività europea, accanto al Wohlers Report, anche le analisi del Joint Research Centre (JRC) della Commissione europea permettono di evidenziare la natura non uniforme della diffusione della tecnologia additive.

Infine, un quarto livello di approfondimento è rappresentato dalla letteratura accademica recente, che integra il quadro statistico con una riflessione di tipo teorico e metodologico. Studi come quelli di Benecchi et al. (Regional DESI: Measuring Digital Divide within EU States; 2023) sull'indice regionale rDESI hanno provato a declinare l'indicatore europeo su scala subnazionale, mostrando come i divari territoriali interni agli Stati membri possano essere tanto rilevanti quanto quelli tra Paesi. Altri lavori, come quello di Abdelaal (2024) sull'adozione dell'intelligenza artificiale nelle imprese tedesche mettono in evidenza i fattori organizzativi e culturali che influenzano la diffusione delle tecnologie digitali, offrendo chiavi di lettura qualitativa indispensabili per interpretare e comprendere i dati quantitativi (AI Adoption in German SMEs: Organizational and Culture Drivers; 2024).

## Strumenti complementari al DESI

Strumento	Ambito di analisi	Valore aggiunto per la ricerca
DESI	Quadro macro sulla digitalizzazione: connettività, capitale umano, integrazione tecnologie e servizi pubblici digitali	Offre un quadro comparativo sintetico, utile come cornice di riferimento per l'intera analisi
IFR – World Robotics Report	Robotica industriale: installazioni annuali, stock di robot, densità robotica per Paese e settore	Consente di misurare concretamente il grado di automazione industriale, integrando l'indice DESI con dati settoriali
Eurostat	Adozione ICT nelle imprese, uso di AI, cloud, big data; competenze digitali per fasce demografiche e territoriali	Permette analisi più granulari e disaggregate per Paese, settore, dimensione d'impresa e caratteristiche demografiche
Wohlers Report / JRC	Manifattura additiva (stampa 3D): mercato globale ed europeo, settori applicativi (aerospace, medicale, automotive)	Integra dati quantitativi settoriali specifici, arricchendo l'analisi su stampa 3D con prospettive economiche e industriali
Letteratura accademica recente	Approfondimenti teorici e metodologici; declinazione regionale (rDESI); studi di caso su barriere e driver di adozione	Fornisce interpretazioni aggiornate, individua barriere organizzative/culturali e amplia la comparazione con prospettive qualitative

*Figura 2.2: Strumenti complementari al DESI*

*Fonte: Commissione Europea (DESI 2022 Report; Digital Decade Country Reports 2023-2024); International Federation of Robotics (World Robotics Report 2024); Eurostat (Database ICT Usage in Enterprises, 2023-2024); Wohlers Associates (Wohlers Report 2024); Joint Research Centre (JRC, 2024).*

La tabella 2.2 mette in evidenza come il DESI, pur offrendo un quadro comparativo del livello di digitalizzazione, debba essere affiancato da strumenti più specifici per analizzare le differenze settoriali e territoriali. I dati IFR permettono di monitorare concretamente il grado di automazione industriale, mentre i dataset Eurostat forniscono analisi sulle imprese e sulle competenze della popolazione. Allo stesso modo, il Wohlers Report e le analisi del JRC consentono di approfondire il settore, completando così il quadro descritto dal DESI. In questo modo l'analisi non si limita ad un solo indice, ma integra diverse prospettive, restituendo un'immagine più completa e articolata della transizione digitale europea.

## 2.3 Adozione delle tecnologie digitali e 4.0 in Europa

Quando si osserva la traiettoria italiana nella transizione digitale emerge un quadro abbastanza complesso e contraddittorio. Da un lato, il Paese si colloca stabilmente nella fascia medio-bassa della graduatoria europea, come testimoniato dai dati evidenziati nella figura 2.1, con un punteggio inferiore alla media europea. Dall’altro lato, l’Italia mostra alcune eccellenze settoriali e territoriali, soprattutto nella dizione robotica e in comparti manifatturieri avanzati, che la rendono un caso emblematico di transizione “a due velocità”.

Un elemento importante per valutare il grado di maturità digitale dei sistemi produttivi europei è l’adozione del cloud computing, che viene ormai considerato un prerequisito fondamentale per l’innovazione avanzata. Il cloud non è soltanto un servizio di tipo informatico aggiuntivo, ma una vera e propria infrastruttura abilitante: permette alle aziende di accedere a risorse scalabili, di ridurre i costi fissi, di integrare applicazioni di intelligenza artificiale e big data analytics, e di gestire in maniera più sicura e flessibile i flussi informativi.

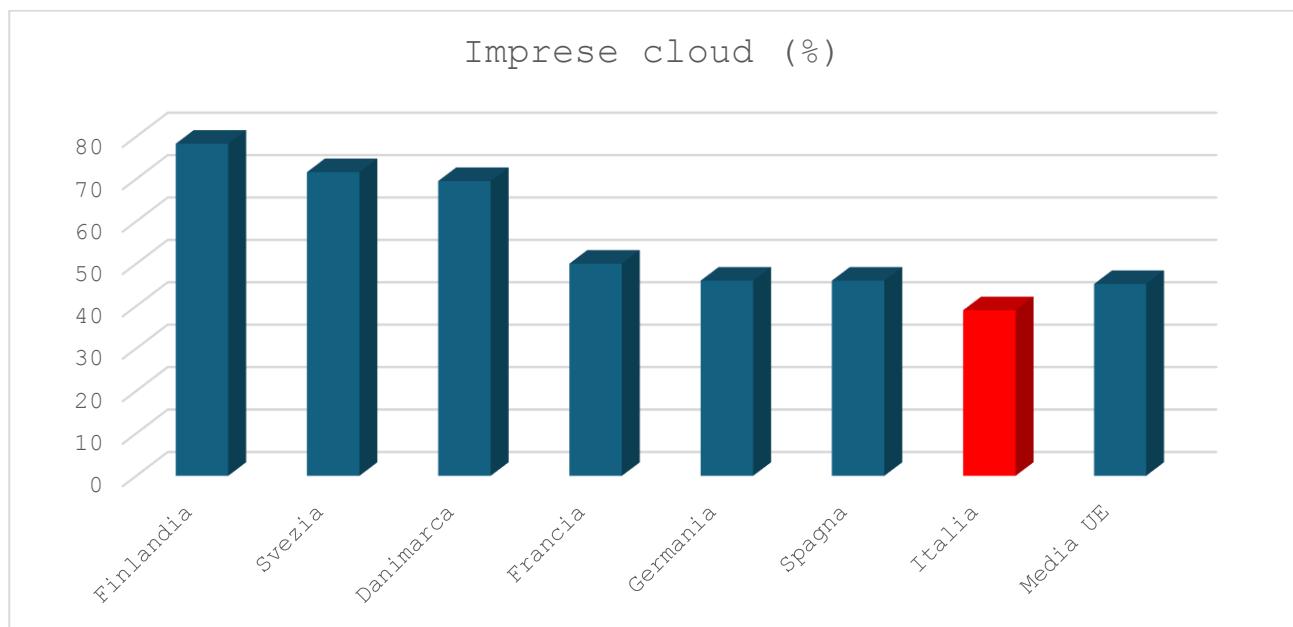


Figura 2.3: Imprese che utilizzano servizi cloud nei Paesi europei selezionati.

Fonte: Eurostat, *Cloud computing services used by enterprises, 2023*.

Secondo i dati più recenti disponibili di Eurostat (2023), come evidenziato dalla figura 2.3, il 45,2% delle imprese europee utilizzava sistemi cloud con differenze molto significative tra i paesi membri.

Nei paesi nordici, che si confermano leader nella digitalizzazione, i valori sono nettamente superiori: Finlandia 78,3%, Svezia 71,6% e Danimarca 69,5%. Si tratta di percentuali che confermano e indicano un'adozione capillare non solo tra le grandi aziende, ma anche tra le PMI, e che riflettono l'elevata qualità delle infrastrutture digitali e la diffusione di competenze avanzate (Eurostat, Cloud computing services used by enterprises, 2023). La situazione si rovescia se si osservano i principali paesi dell'Europa continentale. La Germania registra valori in linea con la media, con circa il 46% delle imprese che dichiarano di utilizzare il cloud, mentre la Francia si posiziona leggermente sopra, attorno al 50%. La Spagna ha compiuto progressi notevoli: dal 2018 con un valore pari al 23% è passata nel 2023 ha raggiunto il 46%, grazie a politiche pubbliche incentrate sul sostegno delle PMI digitali, raggiungendo la media europea.

L'Italia invece, come evidenziato in rosso dalla figura 2.3, continua a rimanere indietro, con valori inferiori al 40% delle imprese. Non si tratta solo di una differenza quantitativa, ma anche qualitativa. Nei paesi leader, infatti, il cloud viene utilizzato per funzioni avanzate come piattaforme di pianificazione delle risorse aziendali, database, strumenti di analytics e intelligenza artificiale. In Italia, invece, l'adozione è ancora prevalentemente associata ai servizi basilari con scarso ricorso a soluzioni evolute che permettono salti di produttività.

Il divario riguarda anche la dimensione d'impresa. In tutta l'Unione europea, oltre il 70% delle grandi aziende adotta il cloud mentre il 44% delle PMI. In Italia questo divario è ancora più evidente; le PMI, infatti, faticano a integrare il cloud nei processi, sia per motivi di costo sia per la percezione che si tratti di uno strumento strettamente non necessario alla propria attività (Eurostat 2023).

Dal punto di vista settoriale, i tassi di adozione più alti si registrano nei servizi ICT, nella finanza e nelle telecomunicazioni, a differenza della manifattura che rimane mediamente più indietro. In Germania, tuttavia, si osserva una rapida crescita nel settore manifatturiero, in particolare nella gestione integrata delle supply chain e nella manutenzione predittiva, segno di un'integrazione sempre più stretta con l'industria 4.0.

Il cloud computing, quindi, rappresenta uno spartiacque tra un'Europa che corre veloce e un'altra che arranca. Paesi come Finlandia, Danimarca e Svezia hanno reso il cloud parte integrante del tessuto produttivo, mentre Italia, Grecia e Romania restano ai margini di questa trasformazione. Le implicazioni non sono secondarie: senza un'adozione diffusa di servizi cloud evoluti, diventa difficile implementare su larga scala intelligenza artificiale, big data e applicazioni di automazione avanzata. La sfida per i prossimi anni sarà dunque duplice: colmare il ritardo quantitativo nei paesi

in difficoltà e incentivare l'uso dei servizi avanzati in quelli che già utilizzano il cloud in forme basilari, così da trasformarlo in un vero motore della competitività europea.

Se sul fronte delle competenze e dell'integrazione digitale le imprese italiane mostrano scarsi risultati rispetto alla media europea, il quadro cambia radicalmente quando si analizzano i dati relativi all'automazione e alla robotica industriale.

Secondo l'IFR-World Robotics 2024, l'Europa ha registrato nel 2023 un record assoluto con 92.393 nuove installazioni di robot industriali, in crescita del 9% rispetto al 2022, evidenziando una dinamica di espansione continua negli anni (IFR, World Robotics 2024).

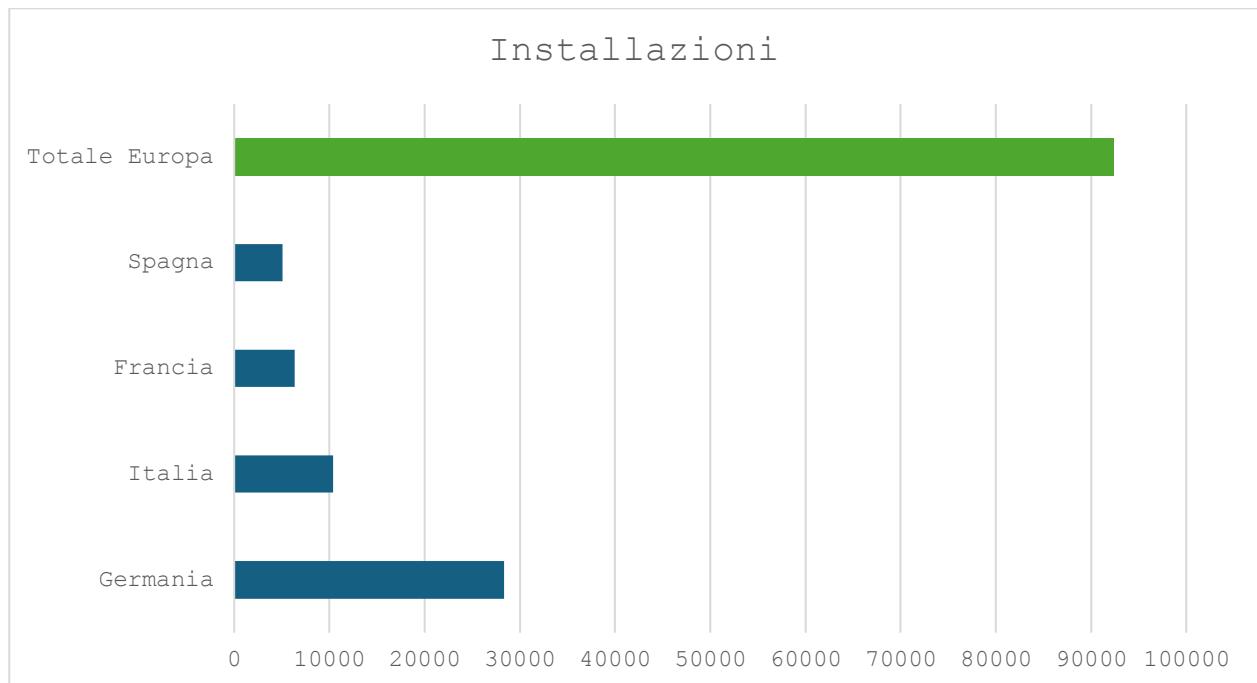
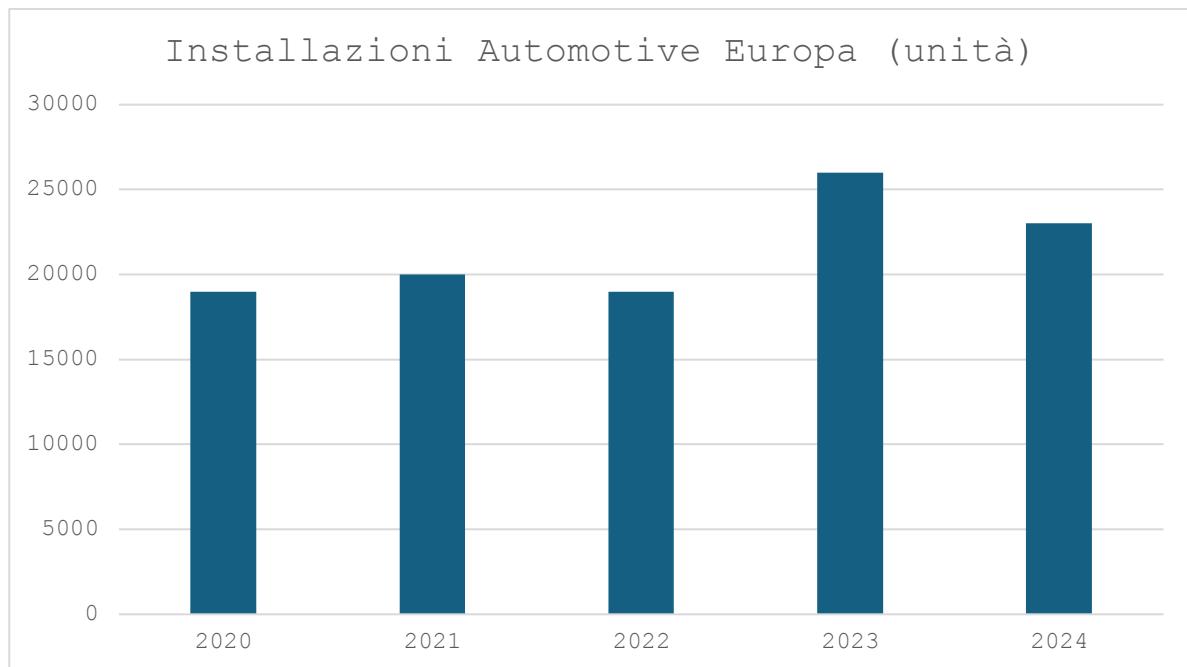


Figura 2.4: Installazioni di robot industriali in Europa

Fonte: International Federation of Robotics (IFR), World Robotics Report 2024.

La figura 2.4 mostra come all'interno del continente, la Germania si trovi in cima nel mercato, con oltre 28.000 unità installate, pari quasi a un terzo del totale europeo. Subito dopo troviamo l'Italia, con 10.422 nuove installazioni, davanti alla Francia (6.386) e alla Spagna (5.500). La crescita però, non può essere considerata omogenea. Alcuni paesi, infatti, mostrano un rallentamento importante mentre altri crescono rapidamente. Questi dati confermano che la robotica rappresenta un settore dove l'Italia ha alcuni punti di forza, ma rimane a distanza significativa dai leader continentali.

Il grafico ufficiale IFR, riportato di seguito nella figura 2.5, mostra l'andamento delle installazioni robotiche nel settore automotive europeo, il settore che, da solo, costituisce circa un terzo della domanda complessiva. Nel 2024 le nuove installazioni hanno raggiunto quota 23.000 unità, il secondo miglior risultato degli ultimi 5 anni, a dimostrazione di come la trasformazione digitale nel settore automobilistico passi innanzitutto dall'automazione fisica.



*Figura 2.5: Installazioni annuali di robot industriali nel settore automotive europeo (2020-2024)*

*Fonte: International Federation of Robotics (IFR), World Robotics Report 2024.*

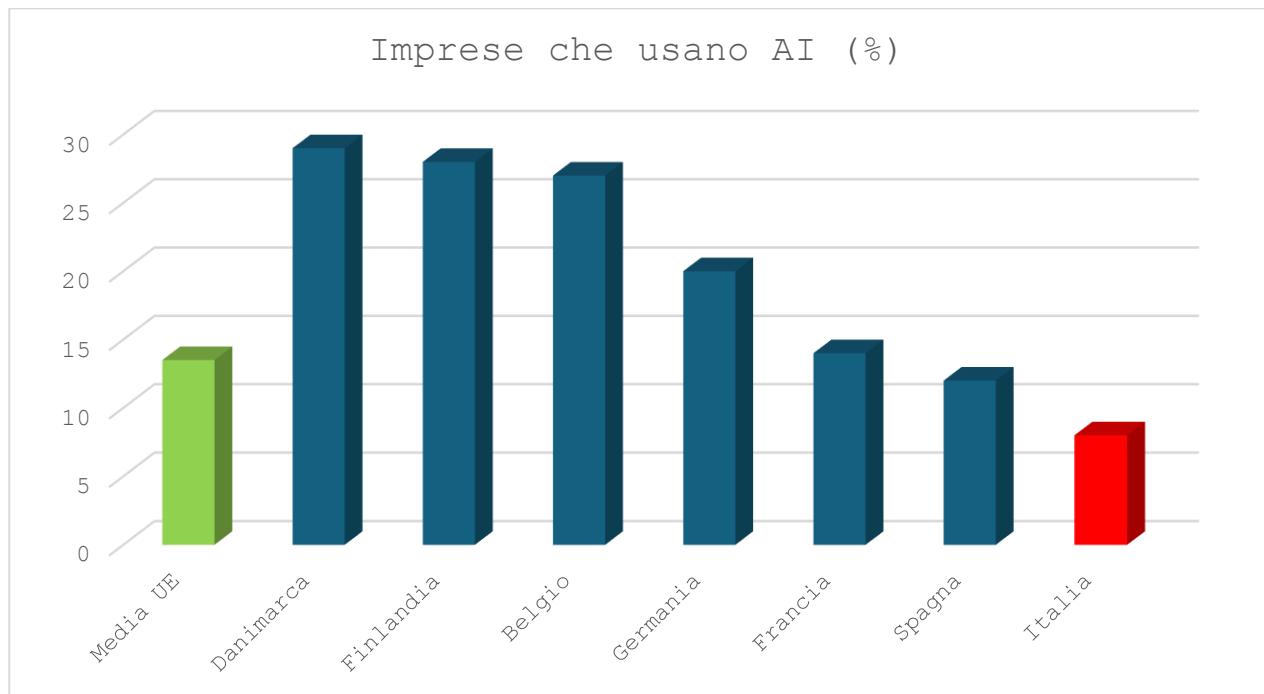
In questo ambito la Germania rimane leader del settore, ma l'Italia e la Spagna rappresentano due poli fondamentali, grazie alla presenza di grandi produttori e di una filiera di fornitori altamente specializzati.

Questi dati confermano che, nonostante i ritardi a livello digitale del paese, l'Italia mantiene una forte propensione verso l'automazione fisica, coerente con la sua struttura industriale. I distretti manifatturieri del nord, in particolare in Lombardia, Emilia-Romagna, Veneto e Piemonte, costituiscono poli d'avanguardia nell'uso della robotica, con applicazioni che spaziano dall'automotive alla metalmeccanica, fino alla lavorazione specializzata della plastica e della gomma. Non a caso la densità robotica italiana è tra le più alte nel settore.

Se si amplia l'analisi anche al resto d'Europa emergono tendenze differenziate. Nei paesi nordici, pur non avendo numeri avvicinabili all'Italia e alla Germania, l'adozione della robotica e delle nuove tecnologie è in forte crescita. La Francia, per esempio, sta accelerando negli ultimi anni lo sviluppo industriale ad alta tecnologia grazie a interventi pubblici mirati e a iniziative legate alla green economy. La Spagna, infine, si conferma un mercato dinamico, caratterizzato da una forte spinta del settore automotive e da una crescente domanda dell'industria alimentare e della logistica. A livello globale l'Europa si posiziona al secondo posto per numero di nuove installazioni, subito dopo l'Asia, ma continua ad essere superata dalla Cina, che da sola concentra oltre il 50% della domanda mondiale di robot industriali (IFR 2024). Tuttavia, l'Europa mantiene una posizione di eccellenza sul fronte della qualità tecnologica e della densità robotica.

Nel complesso la robotica rappresenta un punto di forza per l'Italia, distinguendola da altri paesi rispetto agli altri aspetti della digitalizzazione, nei quali mostra qualche ritardo. L'elevata densità robotica e la crescita di nicchie specializzate fanno sì che il nostro paese rimanga competitivo all'interno dell'industria 4.0, dimostrando come la capacità di integrare automazione industriale e know-how competitivo possa compensare, in parte, le carenze riscontrate in ambiti come l'intelligenza artificiale, il cloud o le competenze digitali della popolazione.

Un altro aspetto fondamentale e centrale della trasformazione digitale europea è l'adozione da parte delle imprese e l'integrazione dell'intelligenza artificiale, diffusasi negli ultimi anni. Se il cloud computing rappresenta l'infrastruttura abilitante, l'AI ne è l'applicazione più avanzata, capace di trasformare completamente i processi decisionali e i processi produttivi.



*Figura 2.6: Imprese che utilizzano tecnologie di intelligenza artificiale, 2024*

*Fonte: Eurostat, Use of artificial intelligence in enterprises (2024/2025)*

I dati più recenti disponibili di Eurostat, riportati nella figura 2.6, mostrano come l'uso di queste tecnologie sia ancora limitato ma sempre in forte crescita: dal 2021 al 2024 infatti, la quota di imprese europee che dichiarano di utilizzare almeno una tecnologia di intelligenza artificiale è aumentata da un valore del 7% a un valore del 13,5%, con tassi di aumento maggiori rispetto a paesi del nord Europa e dell'Europa occidentale (Eurostat, Usage of AI Technologies in enterprises, 2024). Anche in questo caso l'Europa è molto frammentata dalle diseguaglianze. In Danimarca e Finlandia, quasi un'impresa su tre utilizza tecnologie AI (rispettivamente il 29% e il 28%), seguite dal Belgio (27%). Interessante il fatto che questi paesi, hanno già superato il target fissato dalla Commissione Europea per il 2030, grazie alla creazione di un ecosistema favorevole allo sviluppo, caratterizzato da infrastrutture digitali, capitale umano qualificato e politiche pubbliche di sostegno. La Germania si colloca ad un piano inferiore, con circa il 20% delle imprese che utilizza intelligenza artificiale, soprattutto nei settori automotive e manifatturiero. La Francia e la Spagna presentano valori compresi tra il 12% e il 15%, superiori alla media europea, ma ancora lontani dai leader nordici.

L'Italia invece si trova nettamente su livelli più bassi. Nel 2024 infatti appena l'8% delle imprese italiane dichiarava di utilizzare strumenti di intelligenza artificiale, un dato che la colloca ben al di sotto della media europea e accanto a paesi come Grecia e Slovacchia.

Altro elemento che emerge chiaramente anche in questo caso è il divario della dimensione d'impresa. In tutta l'Europa l'adozione di intelligenza artificiale da parte delle grandi imprese è circa tre volte superiore a quella da parte delle PMI (Eurostat, Use of artificial intelligence in enterprises, 2024). Il risultato è che l'AI rimane una prerogativa di poche grandi aziende, di solito multinazionali o imprese dei settori più innovativi, mentre la gran parte delle imprese produttive europee ne resta esclusa.

Anche i settori economici mostrano significative differenze. Nei servizi ICT e finanziari l'adozione dell'AI supera in media il 20% delle imprese, grazie soprattutto alla possibilità di automatizzare processi, analizzare grandi quantità di dati e sviluppare prodotti personalizzati. Nel manifatturiero, invece, l'integrazione procede a ritmi più lenti, ma con un forte potenziale sulla manutenzione predittiva che viene già implementata in paesi come la Germania e i Paesi Bassi.

Questa eterogeneità in questo campo solleva interrogativi importanti per la competitività europea. Per l'Italia in particolare, l'adozione limitata di sistemi di intelligenza artificiale si traduce in una perdita di competitività, soprattutto in un contesto globale dove gli Stati Uniti hanno già superato la soglia del 25% di imprese che implementano tali sistemi e la Cina ha reso l'AI parte integrante dei propri sistemi produttivi grazie a una serie di forti investimenti pubblici.

In definitiva possiamo considerare l'intelligenza artificiale come il vero e proprio banco di prova della trasformazione digitale europea. La sua adozione, infatti, riflette e amplifica i divari già esistenti. Se non affrontati questi squilibri rischiano di accettuare il divario tra paesi e imprese, con alcune economie capaci di sfruttare al meglio le potenzialità offerte da queste tecnologie ed altre destinate a non riuscire mai ad assorbire queste potenzialità.

Un ulteriore campo che merita attenzione è quello della stampa 3D e dell'additive manufacturing (AM), che negli ultimi anni si è affermato nel mercato europeo come una delle tecnologie più promettenti. La sua diffusione, tuttavia, non è uniforme e presenta sostanziali differenze sia tra i Paesi che tra le dimensioni d'impresa. Secondo i dati dell'Eurostat, nel 2023 circa il 7% delle imprese europee utilizzava soluzioni di stampa 3D. Tale quota cresce fino a oltre il 20% tra le grandi imprese, a differenza delle PMI dove il valore rimane più contenuto, tra il 5% e il 7% (Eurostat, Enterprises using 3D printing, 2023). Le principali differenze tra paesi sono riportate nella figura 2.7.

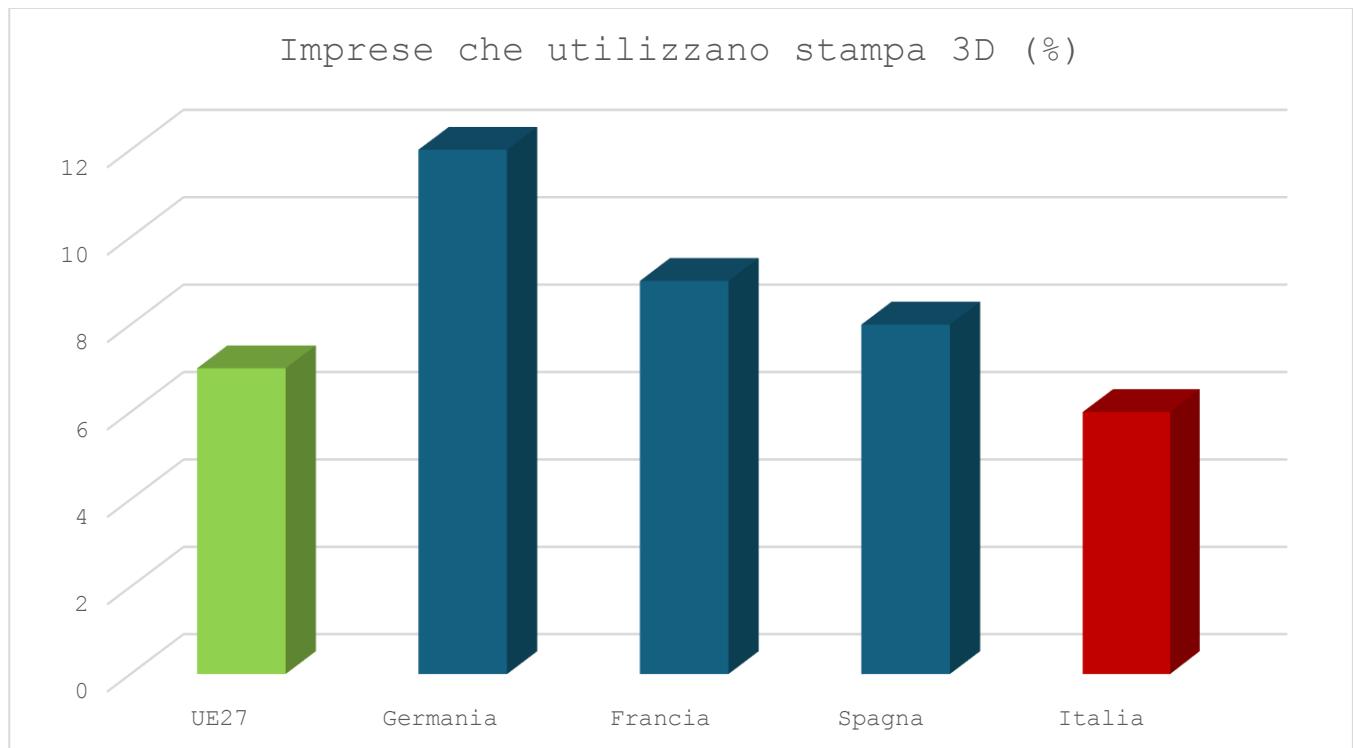


Figura 2.7: imprese che utilizzano la stampa3D in Europa

Fonte: Eurostat, *Enterprises using 3D printing (2023)*

Se si osserva il quadro comparativo tra i paesi anche qui la Germania si conferma leader dell'Europa, con oltre il 12% delle imprese che utilizzano e adottano l'additive manufacturing. Questo grazie al forte sviluppo dell'industria tedesca, al ruolo dei centri di ricerca come il Fraunhofer institute e grazie agli investimenti pubblici e privati mirati a integrare la stampa 3D nei processi industriali avanzati (Wohlers Report 2024).

La Francia, trainata soprattutto dal settore dell'aerospazio e del medicale, settori in cui l'adozione è già parte integrante della filiera produttiva, segue con valori vicini al 9%. La Spagna si aggira intorno all'8% mentre l'Italia rimane sotto la media europea (7%) con circa il 6% delle imprese che utilizza tecniche di stampa 3D. Nonostante il valore sia al di sotto della media europea, l'Italia, come già detto nasconde delle vere e proprie nicchie di eccellenza a livello territoriale e settoriale. Nelle Marche, ad esempio, l'additive manufacturing viene applicato nel settore biomedicale al fine di ottenere la produzione di protesi e impianti personalizzati.

Il valore economico di questo mercato conferma inoltre la rilevanza di questa tecnologia. Secondo il Wohlers Report 2024, il mercato europeo dell'additive manufacturing si aggirava intorno ai 5,5 miliardi di dollari nel 2023, con una proiezione di crescita che supera i 7 miliardi entro il 2030, corrispondente a un tasso annuo di circa il 14%.

Quest'evoluzione è trainata soprattutto dal segmento dei metalli, materiale fondamentale per le nuove tecnologie, che nel 2023 ha registrato un incremento del 24,4%, dovuto anche al maggiore sviluppo di questi strumenti (Wohlers Report 2024). Questi dati indicano che la competitività europea dipenda soprattutto dalle applicazioni industriali ad alto valore aggiunto, piuttosto che dalle produzioni su larga scala.

I settori trainanti sono principalmente l'aerospazio, il medicale e l'automotive.

Nell'aerospazio la stampa 3D permette la produzione di componenti sempre più leggeri e resistenti, già certificati per l'impiego. Nel medicale si diffondono con più facilità protesi personalizzate e dispositivi ortopedici, e nell'automotive l'utilizzo dell'additive manufacturing va oltre la prototipazione rapida, includendo parti leggere destinate a ridurre i consumi e le emissioni.

Nonostante il potenziale di questa tecnologia e lo sviluppo del mercato degli ultimi anni, rimangono e persistono barriere significative. Gli ultimi studi infatti fanno emergere come più della metà delle aziende europee segnali la difficoltà nel reperire personale qualificato in grado di gestire software e

materiali. A ciò si aggiunge il costo elevato dei materiali e delle macchine e la mancanza di standard condivisi che rendendo più semplice una piena integrazione nella catena di fornitura.

Nel complesso però, la stampa 3D in Europa, mostra una traiettoria di crescita solida e promettente, con alcuni picchi di diseguaglianza tra paesi. La Germania e la Francia consolidano il loro posto da leader di questo settore, trainati dai settori high-tech e dalle grandi imprese, i paesi nordici favoriscono un'adozione della tecnologia diffusa grazie a politiche mirate, mentre l'Italia e la Spagna avanzano più lentamente, con eccellenze localizzate, ma senza uno sviluppo omogeneo. I paesi dell'Est invece restano ancora più indietro, con un'adozione limitata esclusivamente ai prototipi e alle ricerche accademiche. Per l'Europa, dunque, la sfida fondamentale sarà quella di trasformare una tecnologia in parte ancora di nicchia, in un vero fattore sistematico di competitività, colmando le differenze interne e rendendo l'additive manufacturing più accessibile anche per le PMI europee.

Se adesso allarghiamo l'analisi oltre i confini europei possiamo notare come ciò che emerge sia una situazione di leadership, ma non assoluto, bensì relativa. L'Unione Europea, infatti, si colloca come seconda area mondiale per numero di robot installati, dietro soltanto all'Asia orientale. Secondo l'IFR - World Robotics 2024, nel 2023 la Cina ha installato oltre 290.009 robot industriali, più della metà del totale globale. La Corea del Sud si conferma come il paese con la più alta densità robotica al mondo, con circa 1.012 unità per ogni 10.000 addetti manifatturieri, seguita poi da Singapore e Giappone, mentre la media europea si attesta intorno alle 219 unità. L'Italia, pur essendo sopra la media europea, non supera le 429 unità per 10.000 lavoratori (IFR 2024). Questo dato mostra con chiarezza come l'Europa non riesca a tenere il passo dei Paesi asiatici, che hanno messo al centro dello sviluppo industriale l'automazione digitale. Anche sul fronte degli investimenti in intelligenza artificiale l'Europa appare in ritardo rispetto agli Stati Uniti e alla Cina. Negli USA, la quota delle imprese che utilizza intelligenza artificiale ha già superato il 25%, con valori ancora più elevati nei settori finanziari e di telecomunicazione. In Cina, invece, grazie a investimenti pubblici e privati, il tasso di adozione tra le imprese supera il 30%, con l'obiettivo di diventare leader mondiale entro il 2039. L'Europa, con una media del 13,5%, mostra progressi ma rimane distante dai due leader principali, con un grande rischio di dipendenza tecnologica nei prossimi anni se non riuscirà ad implementare queste nuove tecnologie in modo più rapido ed efficace.

Nel complesso, l'analisi comparativa evidenzia come l'Europa al giorno d'oggi si presenti come un continente diviso al proprio interno e al tempo stesso sotto pressione da parte delle altre grandi aree industriali. Da un lato, i paesi del Nord e del Centro, trainano la digitalizzazione con livelli di adozione tecnologica comparabili ai benchmark globali. Dall'altra, i Paesi del Sud e dell'Est

rimangono ancora indietro, con valori nettamente più bassi sia nelle competenze sia negli investimenti.

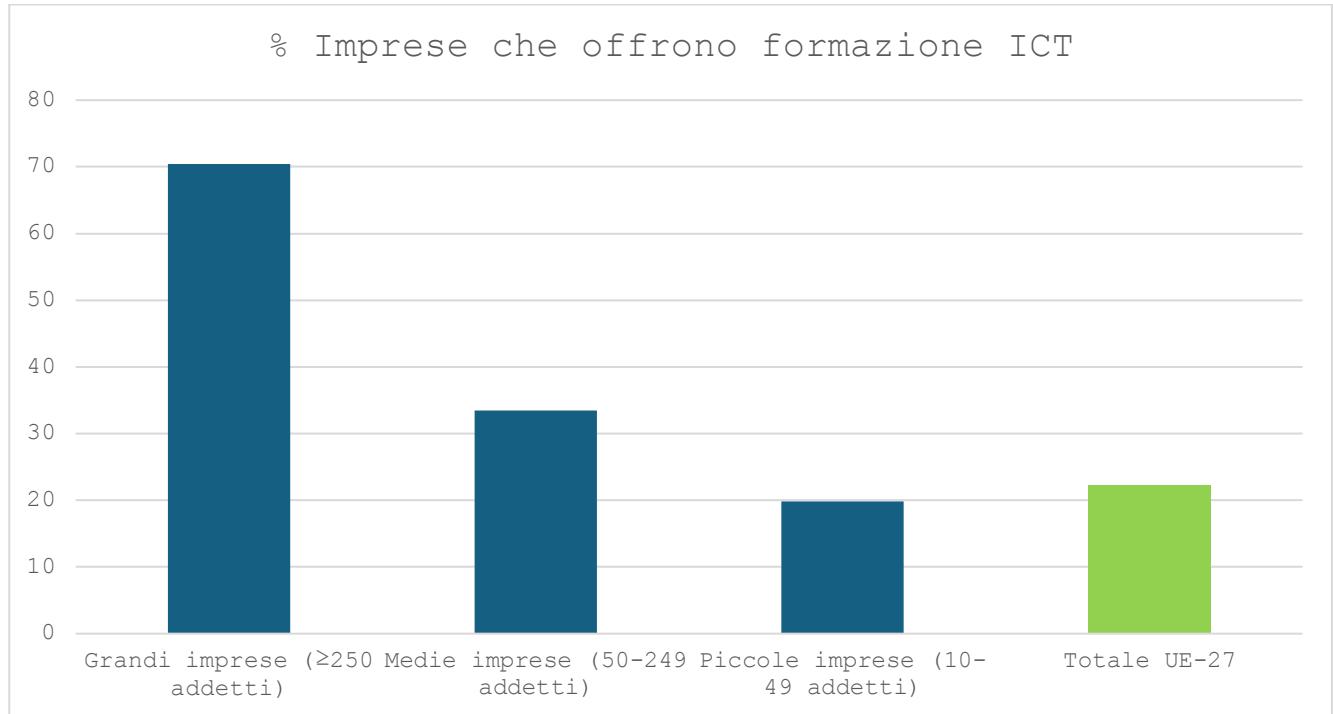
Questa polarizzazione non è sostenibile se l'Europa vuole rafforzare la propria competitività. Perché la transizione 4.0 sia davvero inclusiva ed efficace, infatti, non basta colmare i divari interni: occorre anche incrementare la capacità di investimento complessiva, favorire la collaborazione tra Stati membri e, promuovere politiche comuni capaci di ridurre la dipendenza tecnologica dagli Stati Uniti e dalla Cina. Solo unendo la leadership industriale di paesi come Germania e Italia, con l'avanguardia digitale dei paesi nordici, e sostenendo i ritardi strutturali di Sud ed Est Europa, l'Unione europea potrà collocarsi stabilmente tra i punti di riferimento globali della nuova economia digitale.

## 2.4 Competenze digitali e capitale umano

La trasformazione digitale dipende in modo decisivo dalle competenze delle persone e dagli investimenti in formazione. Per questo motivo la Commissione Europea ha fissato tramite la Digital Decade due obiettivi fondamentali per il 2030: raggiungere i 20 milioni di specialisti ICT e garantire che almeno l'80% degli adulti abbia competenze digitali di base (Commissione Europea, Digital Decade-Targets 2030). Si tratta di target ambiziosi che mettono in luce quanto sia davvero importante il capitale umano come fattore produttivo della transizione 4.0.

Se osserviamo più attentamente le statistiche sulla formazione, emergono differenze sostanziali non solo tra Paesi ma anche all'interno delle imprese stesse. Nel 2024, quasi la metà degli adulti europei nella fascia di età compresa tra i 25 e i 64 anni ha partecipato ad almeno un'attività di formazione nel corso dell'anno, segnale che in molte aree dell'Europa l'aggiornamento continuo sta diventando parte fondamentale della vita lavorativa. In Italia, tuttavia, questo dato è molto inferiore: la formazione infatti rimane episodica, spesso legata a corsi obbligatori o ad iniziative individuali. Le conseguenze sono evidenti. In un contesto in cui le tecnologie si rinnovano in tempi sempre più rapidi, la capacità di aggiornare le competenze diviene essenziale, onde evitare il rischio di obsolescenza, sia per le imprese che per i lavoratori. I Paesi con alti tassi di partecipazione alla formazione degli adulti riescono a mantenere più facilmente il passo con queste trasformazioni, a discapito di quei Paesi, come l'Italia, con una bassa partecipazione, e che faticano a garantire che la forza lavoro sia realmente pronta ad assorbire l'innovazione.

Un ulteriore elemento critico riguarda la formazione in impresa, ossia l'impegno dietro delle aziende nell'offrire percorsi di aggiornamento ai propri dipendenti.



*Figura 2.8: imprese che offrono formazione ICT per dimensione*

*Fonte: Eurostat, Enterprises providing training to develop ICT skills, 2024*

I dati Eurostat mostrano che tra il 2023 e il 2024 solo il 22,3% delle imprese europee ha erogato corsi di formazione ICT. Dietro questo valore medio però si nasconde un divario enorme. Tra le grandi imprese, infatti, oltre il 70% investe in percorsi di aggiornamento mentre tra le piccole imprese la quota scende al di sotto del 20%.

L'Italia riflette e amplifica questa tendenza. I grandi gruppi industriali, soprattutto nel settore manifatturiero avanzato, hanno iniziato da anni a costruire academy aziendali interne, spesso in collaborazione con università e centri di ricerca, al fine di garantire ai propri dipendenti corsi continui di formazione e aggiornamento in materia di tecnologie emergenti. Alcune multinazionali italiane hanno persino esteso questi corsi alle filiere di subfornitura, offrendo corsi anche a piccoli partner della catena produttiva. Tuttavia, la grande maggioranza delle piccole medie imprese Italia non investe in modo sistematico, con corsi spesso saltuari e raramente orientati a competenze avanzate.

Il risultato è che permane una frattura importante tra imprese leader e imprese follower.

Ulteriore nodo centrale e che merita attenzione è la disponibilità di specialisti ICT, figure professionali che rappresentano l'ossatura stessa della transizione digitale. Si tratta di programmati, analisti di dati, esperti di cybersecurity, sviluppatori di intelligenza artificiale e ingegneri, senza i quali l'adozione di nuove tecnologie nelle imprese rischierebbe di rimanere incompleta o superficiale.

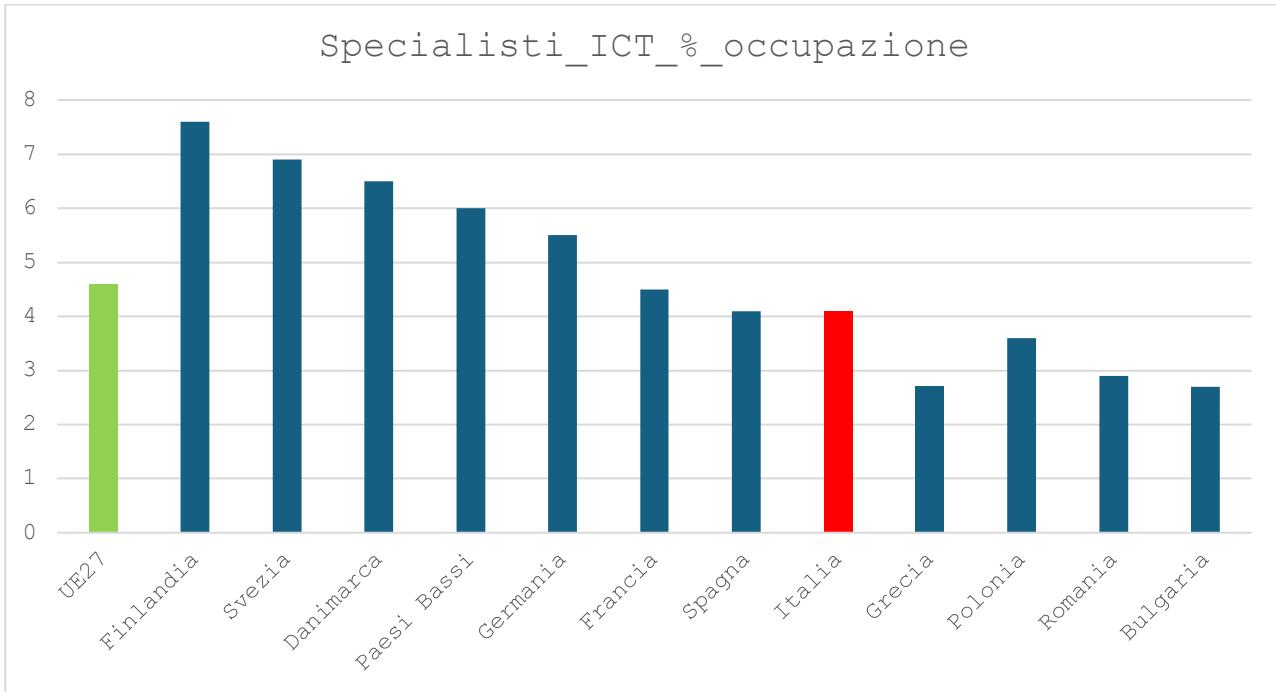


Figura 2.9: specialisti ICT in Europa, 2024 (%)

Fonte: Eurostat, *ICT specialists in employment, 2024*.

Nel 2024, secondo i dati Eurostat, come si può notare dalla figura 2.8, in Europa la quota di specialisti ICT è cresciuta significativamente, con paesi come la Finlandia e la Svezia che superano la media europea.

L'Italia invece, resta indietro, con un livello che non è molto distante dalla media, ma sufficiente a generare un gap in termini di capacità competitiva. Questo ritardo si traduce concretamente in una minore disponibilità di esperti capaci di gestire progetti complessi come l'introduzione di algoritmi di intelligenza artificiale nei processi produttivi. In particolare, i distretti manifatturieri italiani del nord, si trovano spesso in difficoltà nel trovare personale adatto per ruoli tecnici specifici, come gli ingegneri di automazione o i data analyst, figure ormai indispensabili per l'industria 4.0.

A rendere tutto ciò ancora più complesso è la disparità di genere. Nel 2024, infatti, solo il 19,5% degli specialisti in ICT in Europa era donna, un dato che segnala una forte diseguaglianza nel settore. In Italia la quota femminile resta bassa, circa 16/17 %. Questa esclusione sistematica di metà della popolazione non solo limita le opportunità di carriera per le donne, ma riduce in modo

sensibile il valore complessivo di competenze disponibili. In un momento in cui la domanda di profili ICT cresce a dismisura e a ritmi molto più rapidi dell'offerta, trascurare il potenziale femminile significa autoimporre un vincolo che frena la competitività del paese.

Il tema di genere, inoltre, si interfaccia con quello della formazione universitaria. In Italia c'è una bassa quota di laureati in ICT, e tra questi la quota femminile è ancora più bassa. Nei paesi nordici invece, non solo la percentuale di laureati in questo settore è più elevata, ma si registrano programmi di sostegno attivi, volti ad aumentare la presenza femminile attraverso borse di studio, percorsi dedicati e campagne di sensibilizzazione. La conseguenza principale è che la categoria di specialisti ICT in Italia non solo è numericamente ridotta, ma anche scarsamente diversificata, con un impatto negativo sull'innovazione. Gli studi infatti dimostrano che i team più eterogenei per genere ed età continuano a sviluppare soluzioni più creative e competitive.

Dal lato culturale, inoltre, tale differenza alimenta stereotipi che rendono le professioni tecnologiche poco attrattive per le giovani donne, con un effetto a catena sulla pipeline di competenze future.

In definita, la scarsità di specialisti ICT e la loro distribuzione disomogenea rappresentano un vero e proprio tallone d'Achille per la transizione digitale nel settore manifatturiero europeo, e in particolare in quello italiano, rischiando così di non sfruttare appieno le potenzialità di queste nuove tecnologie rimanendo su un'adozione parziale e limitata.

Oltre i divari di genere dobbiamo parlare anche dei divari generazionali nelle competenze digitali.

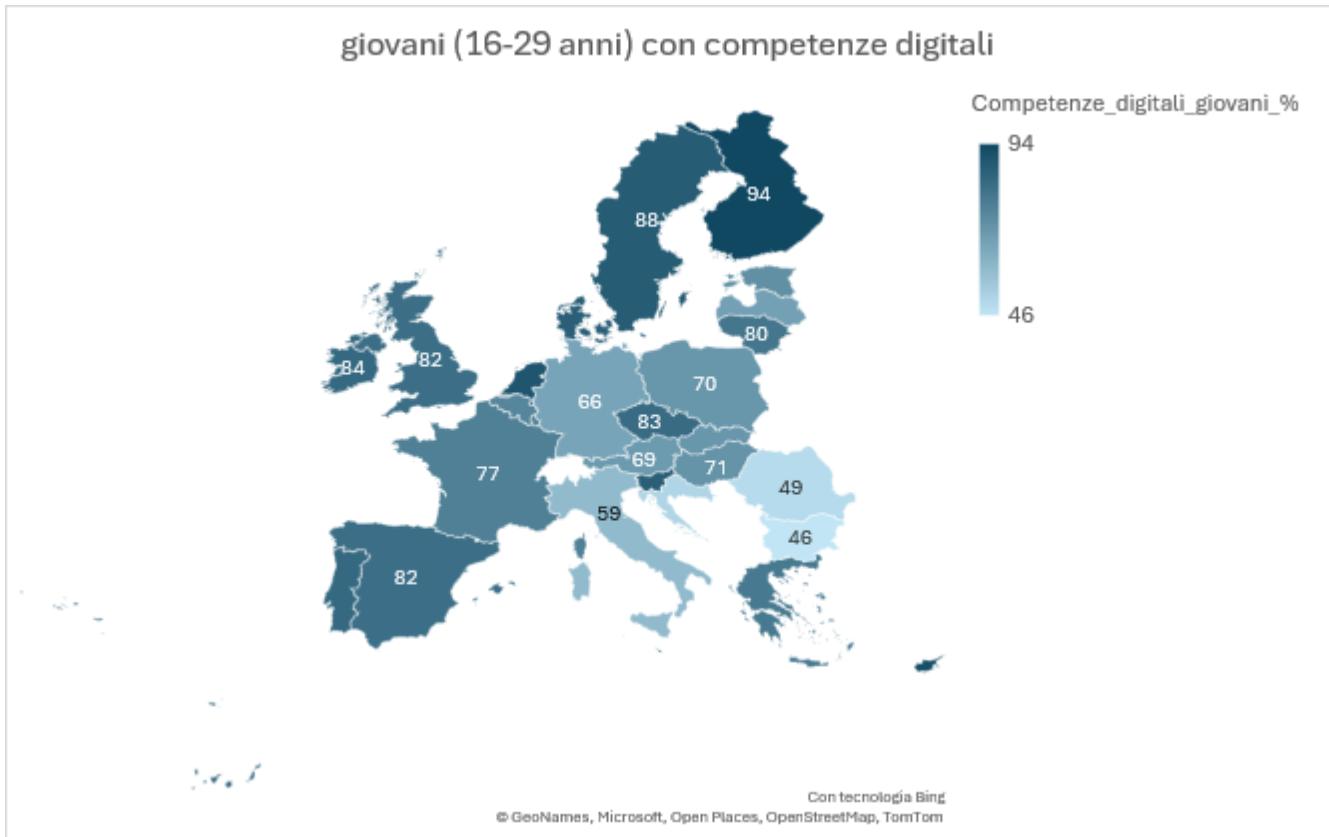


Figura 2.10: giovani (16-29 anni) con competenze digitali di base o superiori, 2023-2024 (popolazione %)

Fonte: Eurostat, *Digital skills of individuals*, 2024

Le statistiche, riportate nella figura 2.8, mostrano come i giovani, compresi tra i 16 e i 29 anni, possiedono una familiarità molto più alta con strumenti digitali di base, spesso superiori al 70% nei paesi nordici, mentre la percentuale scende drasticamente nelle fasce d'età più mature (55-64), dove in gran parte dell'Europa non si raggiunge il 40% (Eurostat, *Digital skills of individuals*, 2024). Anche in Italia quasi due terzi dei giovani dimostrano di avere competenze digitali di base, ma tra i lavoratori più anziani il livello scende a poco più di un terzo.

La questione però, non è puramente statistica. Nel settore manifatturiero europeo e in quello italiano, la forza lavoro ha un'età media relativamente alta rispetto ad altri comparti economici. In molte imprese, soprattutto PMI, la presenza di dipendenti senior è dominante, creando difficoltà nell'introduzione di soluzioni tecnologiche avanzate. Queste tecnologie, richiedendo una certa dimestichezza con l'uso di interfacce digitali, dashboard e sistemi connessi, hanno bisogno di persone qualificate e con competenze specifiche, pena il rischio di rallentare l'adozione o di limitarla a reparti isolati.

Un’ulteriore criticità, particolarmente rilevante nel caso italiano, è rappresentata dal divario tra nord e sud. Se analizziamo gli indicatori più recenti del Digital Economy and Society Index (DESI) e i dati nazionali Istat, emerge un quadro di forti squilibri. Le regioni del Nord m, in particolare Lombardia, Emilia-Romagna, Veneto e Piemonte, mostrano livelli di competenze digitali nella popolazione e di adozione ICT nelle imprese significativamente più alti rispetto al Mezzogiorno. In Lombardia, ad esempio, oltre la metà della popolazione adulta possiede competenze digitali almeno di base, mentre in regioni come la Calabria, la Sicilia o la Basilicata la quota scende sotto il 40%. Non si tratta esclusivamente di un divario di risorse economiche, ma anche di infrastrutture e capitale umano: la maggiore disponibilità di specialisti e di percorsi formativi avanzati al Nord, rende più semplice l’adozione di tecnologie complesse. Al contrario, nelle regioni del sud, l’offerta formativa risulta limitata, rendendo l’accesso a figure professionali qualificate e a tecnologie avanzate molto più difficile.

Al fine di colmare questi squilibri, infatti, la Commissione Europea sottolinea che il successo delle politiche di transizione digitale dipenderà anche dalla capacità di colmare questi squilibri interni. Il PNRR dedica risorse specifiche per rafforzare la connettività e la formazione al sud, ma il rischio di un’Italia a due velocità rimane più che concreto. Se tale divario tra nord Italia e sud Italia non verrà colmato, l’intero paese farà fatica a raggiungere i target europei sulla digitalizzazione, con ripercussioni dirette sul settore manifatturiero e sulla capacità di competere a livello internazionale.

Tutto ciò dimostra dunque come la questione delle competenze digitali non sia solo un problema di “quanti sappiano usare un computer”, ma un insieme di divari complessi: tra grandi e piccole imprese, tra giovani e anziani, tra uomini e donne, tra paesi e tra regioni dello stesso paese. Non sorprende affatto che la commissione Europea stia investendo molto in programmi come il Pact for skills e il Digital Europe Programme. Il primo coinvolge imprese, università e centri di formazione in alleanze strategiche e settoriali al fine di aggiornare lavoratori e creare nuove competenze nelle filiere chiave; il secondo ha stanziato 1,3 miliardi di euro per il periodo 2025-2027, con un focus totale sull’intelligenza artificiale, la cybersecurity e le competenze digitali avanzate.

Per l’Italia, la priorità, rimane quella di ampliare la base di capitale umano digitale. Ciò comporta aumentare non solo il numero di laureati ICT, ma soprattutto garantire percorsi di formazione continua ai lavoratori, coinvolgendo un numero maggiore di donne nei settori tecnologici e colmando il divario generazionale che frena moltissime imprese manifatturiere. Solo così l’adozione delle tecnologie 4.0 potrà garantire una diffusione proficua.

## 2.5 Studi di caso e best practices europee

### Germania: manifattura avanzata e adozione massiccia di robotica

La Germania rappresenta senza dubbio il caso più emblematico di trasformazione digitale nel settore manifatturiero europeo. Il paese ha investito sin da subito nell'industria 4.0, avviando una vera e propria strategia industriale nazionale. A partire dal 2011 infatti, il governo tedesco ha lanciato il programma "industria 4.0", che prevedeva una forte interazione tra istituzioni, università, centri di ricerca e grandi imprese manifatturiere, con l'obiettivo di favorire lo sviluppo e l'integrazione di tecnologie digitali e automazione nei processi produttivi.

I risultati sono coerenti con i dati discussi nel capitolo 2.3. Ricordiamo infatti che la Germania rappresenta uno dei leader del settore Europeo per quanto riguarda la densità robotica, con volumi di installazione tra i più alti in Europa nell'ultimo anno, rendendo il paese uno dei più automatizzati al mondo, insieme alla Corea del Sud, alla Cina e al Giappone.

La centralità della robotica si riflette soprattutto nei settori chiavi dell'industria tedesca, come quello dell'automotive, dell'ingegneria meccanica e della chimica. L'automotive in particolare rimane il cuore pulsante della Germania: circa il 40% delle nuove installazioni robotiche avviene in questo settore, dove aziende leader come Volkswagen, BMW e Daimler hanno integrato all'interno delle aziende sistemi di intelligenza artificiale e piattaforme IoT per ottimizzare la produzione e la logistica interna. Questo approccio ha consentito non solo un aumento in termini di produttività, ma anche miglioramenti in termini di qualità e di sicurezza, con la riduzione e l'eliminazione delle mansioni più ripetitive e pericolose.

Accanto alla robotica, la Germania ha fatto della formazione un pilastro della sua competitività digitale. Il sistema infatti prevede che gli studenti, già durante la formazione secondaria superiore, alternino periodi di studio teorico in istituti tecnici e università con competenze ed esperienze pratiche nelle imprese. In questo modo la forza lavoro entra nel mercato con un background già formato e con competenze aggiornate.

Il modello tedesco, dunque, è caratterizzato da tre elementi chiave:

- visione strategica di lungo periodo
- Investimenti consistenti in robotica e automazione
- Integrazione tra formazione e impresa

Questo approccio consente al settore manifatturiero tedesco di mantenere una posizione di leadership a livello globale ed europeo, e di affrontare con maggiore efficacia le nuove sfide poste dalla transizione digitale.

## **Paesi nordici: tra capitale umano e digitalizzazione delle PMI come modello**

I paesi nordici, Finlandia, Svezia e Danimarca, costituiscono un riferimento internazionale quando parliamo di transizione digitale inclusiva. In continuità con quanto visto nei paragrafi precedenti, la forza dei paesi nordici è un ecosistema molto coeso tra pubblico e privato.

Un primo elemento distintivo anche qui riguarda una visione politica di lungo periodo. Già a partire dagli anni duemila, i governi nordici hanno definito strategie nazionali per lo sviluppo digitale, anticipando e superando i target fissati a livello europeo. La Finlandia, ad esempio, è stata tra le prime nazioni a riconoscere l'accesso a Internet come un diritto fondamentale dei cittadini (2010), obbligando così gli operatori a garantire connettività a banda larga anche nelle aree poco esposte. La Danimarca invece ha costruito e integrato piattaforme pubbliche uniche, come NemID e MitID, che consentono ai cittadini di accedere ai servizi pubblici e privati con un solo sistema di identità digitale. Questo approccio ha fatto sì che si creasse un ambiente favorevole per le imprese, essendo già abituate ad operare e interagire digitalmente.

Dal punto di vista del capitale umano, questi paesi si collocano stabilmente ai vertici europei. Infatti, hanno livelli di competenze digitali tra i più alti in Europa. Questi risultati derivano non solo dalla qualità dell'istruzione di base, ma anche da politiche di lifelong learning. In Svezia, per esempio, le imprese ricevono incentivi fiscali se i loro dipendenti partecipano a corsi di aggiornamento riconosciuti; in Finlandia esistono voucher pubblici che i lavoratori possono utilizzare liberamente per accedere a corsi ICT e STEM.

La vera differenza però con i paesi Europei risiede nella digitalizzazione delle PMI. In Finlandia e in Danimarca, le PMI usano il cloud in modo esteso e per funzioni avanzate. Ma non si tratta solo un uso quantitativo. Le PMI nordiche, infatti, tendono a impiegare soluzioni avanzate anziché limitarsi a funzioni basilari.

Alcuni esempi settoriali possono aiutare a comprendere meglio la portata di questo fenomeno. In Finlandia, il settore forestale è della carta, colonna portante dell'economia nazionale, ha integrato sistemi IoT e cloud per monitorare in tempo reale i macchinari e ottimizzare i consumi energetici.

Anche le piccole segherie locali hanno implementato e adottato sensori e piattaforme digitali, collegandosi così alle grandi aziende del settore.

In Danimarca, il comparto navale ed energetico ha attraversato una trasformazione molto simile. Le piccole medie imprese che producono componenti e che forniscono servizi di manutenzione sono state coinvolte in reti digitali coordinate dai grandi cantieri e operatori energetici. Inoltre, grazie alla diffusione di piattaforme condivise, persino microimprese riescono a gestire ordini, servizi di logistica e assistenza tecnica, aumentando così l'efficienza e riducendo i costi.

La Svezia invece si è distinta per integrazione tra digitale e sostenibilità. Molte PMI manifatturiere hanno adottato sensori IoT per monitorare le emissioni e ridurre gli sprechi, spesso con il sostegno di fondi pubblici per la transizione green. Nel settore metalmeccanico, per esempio, piccole aziende subfornitrici hanno installato sistemi di analisi dei dati per ottimizzare i cicli produttivi e allinearsi agli standard ambientali richiesti dai grandi committenti come Volvo o Ericsson.

Infine, i paesi medici rappresentano un modello anche per la parità di genere. Secondo il Women in Digital Scoreboard 2024, Finlandia e Svezia presentano una quota di donne impiegate in settori ICT pari al 25-27%, di gran lunga superiore alla media europea e all'Italia. Programmi di orientamento nelle scuole, mentoring e borse di studio mirate hanno ampliato le competenze, dimostrando che l'inclusione è una leva concreta per la competitività industriale.

In sintesi, il modello nordico, dimostra che la digitalizzazione diventa realmente efficace quando è diffusa lungo tutte le filiere, dai grandi gruppi alle PMI, e quando la forza lavoro viene costantemente aggiornata e resa partecipe, senza trascurare donne, anziani o microimprese. Questo approccio rende i paesi nordici un laboratorio da cui trarre lezioni preziose per gli altri paesi europei.

## **Settori specifici: aerospazio, medicale e automotive**

Oltre ai casi nazionali è utile analizzare alcuni settori industriali europei che hanno rappresentato dei veri e propri laboratori di innovazione digitale. In particolare, i settori aerospazio, automotive e medicale si distinguono per un alto livello di automazione, per l'uso intensivo di robotica e additive manufacturing, per la forte integrazione tra ricerca, imprese e politiche pubbliche.

### **Aerospazio**

Il comparto aerospaziale europeo rappresenta uno dei campi più avanzati nell'applicazione di tecnologie digitali e additive della cosiddetta industria 4.0. Non si tratta semplicemente di una maggiore automazione dei processi produttivi, ma di una vera e propria trasformazione delle logiche di progettazione, sviluppo e manutenzione dei prodotti e servizi del settore.

Colossi come Airbus hanno fatto da apripista, adottando e implementando già da molti anni la stampa 3D per metalli e polimeri ad alte prestazioni. Ogni chilogrammo risparmiato si traduce in un minor consumo di carburante e in una significativa riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>, in linea con gli obiettivi europei di decarbonizzazione del trasporto aereo (Airbus sustainability Report, 2024).

Un esempio concreto è l'utilizzo della stampa 3D per i supporti metallici del motore A350 XWB, che hanno consentito all'azienda di ridurre di circa il 30% il peso di alcune parti, rispetto ai metodi tradizionali. Inoltre, riducendo i tempi di prototipazione, la stampa 3D ha consentito di passare dall'idea alla realizzazione in poche settimane invece che in mesi.

Il ruolo dell'additive manufacturing è altrettanto centrale anche nel settore satellitare. In Germania e in Francia, aziende come Airbus Defence and Space e Thales Alenia Space utilizzano componenti stampati in 3D per i satelliti di nuova generazione, soprattutto nelle antenne e nei sistemi di supporto. L'obiettivo è quello di combinare leggerezza, resistenza e design complesso. Un caso emblematico è quello del satellite Eutelsat Quantum, il primo al mondo a incorporare elementi stampati grazie alla tecnologia della stampa 3D, con un significativo risparmio di materiali.

L'Italia partecipa attivamente a questo processo grazie a due aziende in primo piano: Leonardo e Avio Aero. Leonardo ha sviluppato centri di eccellenza per la produzione additiva nel settore aerospaziale e della difesa, in particolare nei siti di Pomigliano e Cameri, dove vengono realizzati componenti ad alta resistenza per veicoli militari e civili. Avio Aero, controllata da General Electric, ha invece puntato sulla stampa 3D di componenti per turbine e motori aeronautici. Nel suo stabilimento di Novara, l'azienda produce da anni attraverso processi di additive manufacturing in lega di titanio e super leghe a base di nichel. Secondo il Wohlers Report 2024, oltre il 15% degli investimenti europei in additive manufacturing è destinato al settore dell'aerospazio, una quota che lo colloca al primo posto insieme all'automotive, riflettendone la trasversalità delle applicazioni: dalla prototipazione rapida su componenti strutturali, dalla manutenzione predittiva alla produzione in-demand delle parti di ricambio. Proprio quest'ultimo ambito rappresenta una rivoluzione per l'industria aeronautica che, grazie alla possibilità di stampare in loco i componenti certificati, riesce a ridurre i tempi di fermo degli aeromobili riducendo così i costi di magazzino (European Aviation Safety Agency, 2024).

Un ulteriore elemento strategico è rappresentato dal ruolo delle PMI e dei centri di ricerca. In Italia, per esempio, PMI e start-up della Motor Valley emiliana e del distretto aerospaziale campano collaborano con università e centri di ricerca per sviluppare applicazioni innovative nella stampa 3D. Queste realtà si integrano con i programmi europei finanziati da Horizon Europe e dal Digital Europe Programme, al fine di sostenere la diffusione della produzione additiva anche nelle filiere più piccole.

In definitiva, il settore aerospaziale europeo dimostra come l'additive manufacturing e la robotica possano agire come abilitativi di resilienza industriale.

## **Medicale**

Il settore medicale rappresenta uno dei campi più dinamici e innovativi delle tecnologie digitali additive in Europa. L'adozione di stampa 3D, robotica assistita e soluzioni IoT sta trasformando radicalmente il settore, attraverso nuovi trattamenti e cure, aprendo la strada a una medicina sempre più personalizzata, efficiente e sostenibile.

La stampa 3D viene utilizzata oramai in modo abituale per la produzione di protesi, impianti dentali, strumenti chirurgici, è più recentemente, anche di tessuti biologici sperimentali. In Germania, aziende come EOS collaborano con ospedali universitari di Monaco e Berlino per sviluppare impianti ortopedici su misura, adattati perfettamente al paziente grazie alla tecnologia di scansione 3D. Nei paesi nordici, ospedali come il Karolinska Institute di Stoccolma sperimentano soluzioni di bio stampa per tessuti cartilaginei, con l'obiettivo di ridurre i tempi di attesa e aumentare l'efficacia dei trapianti.

In Italia un ruolo centrale è svolto dal polo biomedicale di Mirandola (Modena), tra i più grandi in Europa. Qui, le imprese, hanno iniziato da tempo a integrare tecnologie di additive manufacturing per la produzione di dispositivi come valvole cardiache, protesi e dispositivi per dialisi. Grazie all'uso combinato, alcuni dispositivi sono in grado oggi di monitorare in tempo reale parametri clinici, trasmettendo dati ai medici e migliorando così la gestione dei pazienti cronici.

La robotica assistiva costituisce un altro pilastro di innovazione. In Germania, per esempio, i sistemi chirurgici robotici come il Da Vinci Surgical System sono ormai ampiamente diffusi, nei paesi nordici i robot collaborativi vengono utilizzati sia in sala operativa che nei reparti di riabilitazione e in Danimarca, piattaforme robotiche di supporto aiutano i pazienti con mobilità ridotta a recuperare le funzionalità motorie, combinando esercizi fisici con il monitoraggio digitale.

Secondo la Commissione Europea (Medical Technologies in Europe, 2024), questo settore è tra i più alti a registrare una crescita rapida di brevetti legati all'additive manufacturing. Ciò dimostra come la personalizzazione di massa, ossia la possibilità di produrre dispositivi standardizzati ma adattabili ad ogni singolo paziente, sia la vera frontiera della sanità digitale. A differenza di altri settori industriali, qui l'innovazione non produce soltanto guadagni in termini di produttività, ma incide direttamente sulla qualità della vita dei cittadini.

## Automotive

Il settore automotive si conferma la colonna portante della robotica industriale europea e uno dei settori più avanzati nell'integrazione delle tecnologie 4.0. Come già detto in precedenza, in Germania, le grandi case automobilistiche, hanno implementato sistemi di robotica collaborativi (cobot), in grado di affiancare i lavoratori nelle fasi di assemblaggio più delicate, riducendo i margini di errore e aumentando la sicurezza.

In Italia il comparto automotive ha un ruolo strategico, con poli produttivi come Torino, Modena e l'Emilia-Romagna che rappresentano veri e propri distretti tecnologici.

Aziende come Ferrari, Maserati e Stellantis hanno iniziato a integrare la stampa 3D anche nella realizzazione di parti funzionali. Ferrari, ad esempio, utilizza componenti prodotte tramite la stampa 3D per i motori da competizione, testandone la resistenza in condizioni estreme prima di trasferire l'uso alla produzione di serie. Maserati, dal canto suo, utilizza la stampa additiva al fine di accelerare il passaggio dal design alla fase produttiva.

Un caso interessante viene dalla Spagna, dove Seat, che fa parte del gruppo Volkswagen, ha avviato un programma di fabbricazione additiva per la produzione interna di componenti. Grazie a questa tecnologia, l'azienda è riuscita a ridurre i tempi di consegna dei ricambi e ad abbattere i costi di logistica e di magazzino.

L'automotive europeo, inoltre, sta vivendo una profonda trasformazione legata alla transizione verso l'ecologico. L'introduzione dell'auto elettrica ha reso necessario un cambiamento delle catene di produzione, stimolando la ricerca su nuovi materiali, batterie e sistemi di gestione energetica, e favorendo così l'utilizzo della stampa 3D.

Un aspetto comune a tutte le grandi case europee è la crescente integrazione di piattaforme digitali di supply chain, in grado di coordinare fornitori, PMI e partner globali attraverso sistemi di cloud e big data. Questa integrazione verticale permette di monitorare in tempo reale la produzione e di

reagire rapidamente crisi globali come la pandemia di qualche anno fa. Se considerati insieme dunque i tre settori analizzati rilevano alcuni tratti in comune di fondamentali:

- una forte integrazione verticale
- L'uso combinato di robotica e additive manufacturing
- La centralità del capitale umano e della formazione continua

Tre pilastri fondamentali per avere successo nella transizione verso l'industria 4.0

## 2.6 Conclusione

Il percorso svolto in questa tesi ha mostrato come la rivoluzione 4.0, lungi dall'essere un processo prettamente tecnologico, sia in realtà un terreno scivoloso caratterizzato da una forte negoziazione di tipo sociale, economico e politico. I dati comparativi hanno evidenziato come l'Europa non sia un paese uniforme ma totalmente frammentato composto da regioni che avanzano rapidamente, integrando tutte le nuove tecnologie di quest'era, e altre invece che faticano a tenere il ritmo, rallentate da limiti infrastrutturali e deficit di capitale umano e formazione. La transizione digitale, così come oggi viene rappresentata, tende a riflettere e amplificare i divari già esistenti. Allo stesso tempo però i casi analizzati nei vari settori hanno dimostrato che l'innovazione non è mai neutrale ma procede soprattutto in quei casi dove vi è una forte integrazione tra imprese, centri di ricerca, istituzioni pubbliche e formazione. In assenza di questo ecosistema le tecnologie restano confinate in nicchie specializzate. Ciò significa che la vera sfida dipende non tanto dalla disponibilità di strumenti digitali quanto nel sapere utilizzarli nella maniera corretta.

Il cuore della transizione dunque è politico. La digitalizzazione del manifatturiero europeo non può essere affidata unicamente alle dinamiche di mercato poiché rischierebbe di produrre un continente diviso. È necessario che le politiche industriali e sociali, vengano poste al centro dell'attenzione, e diventino leve capaci di trasformarne le tecnologie in beni collettivi accessibili a tutti, garantendo una transizione che non lasci indietro interi territori o categorie di lavoratori.

Questa conclusione non chiude ma apre: le domande più urgenti non riguardano più il "se" adottare le nuove tecnologie, ma come e per chi. La transizione digitale sarà davvero compiuta soltanto quando verrà vista come un progetto condiviso di sviluppo industriale e non come un vincolo imposto dalla competizione globale.

## Bibliografia

A. Agrawal, J. Gans, A. Goldfarb, 2018. “Macchine di previsione: la semplice economia dell’intelligenza artificiale”. Harvard Business Review Press.

Acatech – National Academy of Science and Engineering, 2013. “Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group”. acatech.

A. Airbus, 2016. “Additive Manufacturing at Airbus: Lightweight Brackets and Components”. Airbus Publications.

Alloyed (OxMet Technologies), 2021. “Additive Manufacturing of Advanced Alloys”. Company White Paper.

ASQ – American Society for Quality, 2018. “Quality 4.0: A New Paradigm for Quality Management”. ASQ.

ASTM International (Wohlers Associates), 2024. “Wohlers Report 2024: 3D Printing and Additive Manufacturing – State of the Industry”. ASTM International.

A. Autor, D. Dorn, 2013. “The Growth of Low-Skill Service Jobs and the Polarization of the US Labor Market”. American Economic Review 103(5): 1553–1597.

A. Autor, F. Levy, R. J. Murnane, 2003. “The Skill Content of Recent Technological Change: An Empirical Exploration”. Quarterly Journal of Economics 118(4): 1279–1333.

A. Brynjolfsson, A. McAfee, 2014. “The Second Machine Age”. W. W. Norton & Company.

A. Brynjolfsson, D. Rock, C. Syverson, 2017. “Artificial Intelligence and the Modern Productivity Paradox: A Clash of Expectations and Statistics”. NBER Working Paper 24001.

Climate Neutral Data Centre Pact, 2023. “Self-Regulatory Initiative: Targets and Guidelines”. CNDC Pact.

D. Acemoglu, D. H. Autor, 2020. “Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets”. *Journal of Political Economy* 128(6): 2188–2244.

D. Acemoglu, P. Restrepo, 2018. “The Race between Man and Machine: Implications of Technology for Growth, Factor Shares, and Employment”. *American Economic Review* 108(6): 1488–1542.

D. Acemoglu, P. Restrepo, 2019. “Automation and New Tasks: How Technology Displaces and Reinstates Labor”. *Journal of Economic Perspectives* 33(2): 3–30.

D. Deloitte, 2025. “2025 Smart Manufacturing and Operations Survey”. Deloitte.

E. Brynjolfsson, M. Raj, R. Seamans, 2021. “How Susceptible Are Jobs to AI? Evidence from O\*NET”. *Industry and Innovation* 28(2): 215–239.

E. Felten, D. Rock, C. Syverson, 2017. “Artificial Intelligence and the Modern Productivity Paradox: A Clash of Expectations and Statistics”. NBER Working Paper.

E. Prytkova, D. Homburg, R. Marty, A. Peikert, A. Seckelmann, 2024. “TechXposure: A novel measure of European exposure to emerging technologies”. CESifo Working Paper.

E. Susskind, D. Susskind, 2015. “The Future of the Professions”. Oxford University Press.

EIT Manufacturing, 2022. “Skills for the future of manufacturing in Europe”. EIT Manufacturing.

ESIR (EC Expert Group), 2023. “Industry 5.0 and the future of work: making Europe the centre of gravity for future good-quality jobs”. European Commission.

Eurofound, 2022. “Automation, digitisation and platforms: Implications for work and employment”. Eurofound.

European Commission, 2021. “Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry”. Publications Office of the EU.

European Commission, 2022a. “Decision (EU) 2022/2481 establishing the Digital Decade Policy Programme 2030”. Official Journal of the EU.

European Commission, 2022b. “Digital Economy and Society Index (DESI) 2022 – Final Report”. Publications Office of the EU.

European Commission, 2023a. “European Declaration on Digital Rights and Principles for the Digital Decade”. Publications Office of the EU.

European Commission, 2023b. “Regulatory sandboxes and testing facilities for AI in the EU”. European Commission.

European Commission, 2024a. “Artificial Intelligence Act – Regulation (EU) 2024/1689 laying down harmonised rules on artificial intelligence”. Official Journal of the European Union.

European Commission, 2024b. “Digital Decade Country Report 2024: Italy”. Publications Office of the EU.

European Commission, 2024c. “Digital Europe Programme (DEP): Work Programme”. Publications Office of the EU.

European Commission, 2024d. “Horizon Europe – Framework Programme for Research and Innovation”. Publications Office of the EU.

European Commission, 2025. “European Industrial Policy for Artificial Intelligence”. Centro Studi sul Federalismo.

European Parliament Research Service (EPRS), 2024. “Algorithmic management and the EU: risks, rights and the AI Act”. European Parliament.

G. Dauth, S. Findeisen, J. Südekum, N. Wößner, 2021. “Adjusting to Robots: Worker-Level Evidence”. Journal of the European Economic Association 19(6): 3161–3204.

G. Gebhardt, 2018. “Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing”. Hanser.

G. Goos, A. Manning, 2007. “Lousy and Lovely Jobs: The Rising Polarization of Work in Britain”. The Review of Economics and Statistics 89(1): 118–133.

G. Goos, A. Manning, A. Salomons, 2014. “Explaining Job Polarization: Routine-Biased Technological Change and Offshoring”. *American Economic Review* 104(8): 2509–2526.

G. Graetz, G. Michaels, 2018. “Robots at Work”. *The Review of Economics and Statistics* 100(5): 753–768.

G. Schuh, R. Anderl, R. Dumitrescu, A. Krüger, M. ten Hompel, 2020. “Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies – Update 2020”. acatech STUDY.

G. Schuh, et al., 2021. “Using the Industrie 4.0 Maturity Index in Industry: Case Studies”. acatech.

H. Demombynes, R. Gatti, I. Silber, et al., 2025. “Asking Again: AI’s Labor Productivity Implications in Low- and Middle-Income Countries”. *World Bank Policy Research Working Paper* 10741.

H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig, 2013. “Securing the Future of German Manufacturing Industry: Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0”. acatech.

I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, 2021. “Additive Manufacturing Technologies”. Springer.

IMF, 2024. “The Labor Market Impact of AI: Reassessment in the Wake of Deep Learning”. IMF Working Paper WP/24/130.

IMF, 2025. “AI and Productivity in Europe: Evidence from total factor productivity across countries”. IMF Working Paper.

International Federation of Robotics (IFR), 2024. “World Robotics 2024 – Industrial Robots”. IFR.

International Federation of Robotics (IFR), 2025. “Top 5 Global Robotics Trends 2025”. IFR.

ISO/ASTM, 2021. “52900: Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary”. ISO/ASTM International.

ISTAT, 2023. “Imprese e ICT: utilizzo di tecnologie digitali nelle PMI italiane”. ISTAT.

ISTAT, 2024. “Cittadini, imprese e ICT”. ISTAT.

J. Manyika, M. Chui, J. Bughin, et al., 2017. “A Future that Works: Automation, Employment, and Productivity”. McKinsey Global Institute.

JRC – Joint Research Centre, 2023. “Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency”. Publications Office of the EU.

JRC – Joint Research Centre, 2024. “Energy Consumption in Data Centres and Broadband Communication Networks in the EU”. Publications Office of the EU.

K. De Backer, D. Flaig, 2017. “The future of productivity: improving outcomes for SMEs and workers”. OECD Science, Technology and Industry Policy Papers.

K. Schwab, 2016. “The Fourth Industrial Revolution”. World Economic Forum.

K. Schwab, N. Davis, 2018. “Shaping the Future of Production: Four Contrasting Perspectives in 2030”. World Economic Forum.

M. Bloom, E. Brynjolfsson, L. Foster, et al., 2020. “What Drives Differences in Management Practices?”. *American Economic Review* 110(5): 1648–1683.

M. Evans, A. Gawer, 2016. “The Rise of the Platform Enterprise: A Global Survey”. The Center for Global Enterprise.

M. Frank, B. Dalenogare, N. Ayala, 2019. “Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies”. *International Journal of Production Economics* 210: 15–26.

M. Ghobakhloo, 2022. “Identifying Industry 5.0 contributions to sustainable development: A roadmap”. *Journal of Cleaner Production* 333: 130–139.

M. McKinsey Global Institute, 2023. “Generative AI and Productivity: The economic potential of generative AI”. McKinsey & Company.

M. Webb, 2020. “The Impact of Artificial Intelligence on the Labour Market”. Working Paper.

MIMIT – Ministero delle Imprese e del Made in Italy, 2024. “Piano Transizione 5.0: Crediti d’imposta per investimenti 4.0 ed efficienza energetica”. MIMIT.

N. Bloom, E. Brynjolfsson, L. Foster, et al., 2020. “What Drives Differences in Management Practices?”. *American Economic Review* 110(5): 1648–1683.

OECD, 2023. “OECD Employment Outlook 2023: Artificial Intelligence and the Labour Market”. OECD Publishing.

OECD, 2024. “OECD Digital Economy Outlook 2024”. OECD Publishing.

P. Evans, A. Gawer, 2016. “The Rise of the Platform Enterprise: A Global Survey”. The Center for Global Enterprise.

P. Frank, B. Dalenogare, N. Ayala, 2019. “Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies”. International Journal of Production Economics 210: 15–26.

P. Vaezi, S. Chianrabutra, B. Mellor, S. Yang, 2013. “Multiple Material Additive Manufacturing—Part 1: A review”. Virtual and Physical Prototyping 8(1): 19–50.

R. A. Susskind, D. Susskind, 2015. “The Future of the Professions”. Oxford University Press.

S. Bandyopadhyay, S. Bose, 2020. “Additive Manufacturing”. CRC Press.

S. Sony, S. Antony, J. Douglas, 2020. “Essential ingredients for the implementation of Quality 4.0: a narrative review of the literature and future directions for research”. The TQM Journal 32(4): 779–795.

Simone Vannuccini, 2025. “The Making of a European Industrial Policy for Artificial Intelligence”. Centro Studi sul Federalismo.

W. Dauth, S. Findeisen, J. Südekum, N. Wößner, 2021. “Adjusting to Robots: Worker-Level Evidence”. Journal of the European Economic Association 19(6): 3161–3204.

WEF, 2020. “Shaping the Future of Advanced Manufacturing and Production”. World Economic Forum.

WEF, 2022. “Reskilling Revolution: Better Skills, Better Jobs, Better Education for a Billion People by 2030”. World Economic Forum.

WEF, 2023. “The Future of Jobs Report 2023”. World Economic Forum.

WEF, 2025. “The Future of Jobs Report 2025”. World Economic Forum.

Xu, Dawei, Haoran Yang, Marian-Andrei Rizoiu, Guandong Xu, 2025. “From Occupations to Tasks: A New Perspective on Automatability Prediction Using BERT”. arXiv preprint.

## Sitografia

<https://www.acatech.de/publikation/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>

<https://www.acatech.de/publikation/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/>

<https://www.airbus.com/en/newsroom#press-releases>

<https://alloyed.com/>

<https://www.astm.org/>

[https://commission.europa.eu/index\\_en](https://commission.europa.eu/index_en)

[https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age_en)

<https://data.europa.eu/en>

<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/search>

<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/country-reports-digital-decade-report-2023>

<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/communication-internet-policy-and-governance>

<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/launch-european-blockchain-regulatory-sandbox>

<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi>

<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/digital-programme>

<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/testing-and-experimentation-facilities>

<https://e3p.jrc.ec.europa.eu/en/publications/2023-best-practice-guidelines-eu-code-conduct-data-centre-energy-efficiency>

[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Cloud\\_computing\\_-\\_statistics\\_on\\_the\\_use\\_by\\_enterprises](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Cloud_computing_-_statistics_on_the_use_by_enterprises)

<https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news>

<https://commission.europa.eu/news-and-media/news/eurobarometer-survey-confirms-public-support-energy-policy-objectives>

<https://eur-lex.europa.eu/eli/dec/2022/24>

<https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024>

<https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/rules-for-trustworthy-artificial-intelligence-in-the-eu>

[https://fondazionecsf.it/images/2025/RP/FCSF-RP\\_EU-AI-Industrial-policy\\_Vannuccini\\_May2025.pdf](https://fondazionecsf.it/images/2025/RP/FCSF-RP_EU-AI-Industrial-policy_Vannuccini_May2025.pdf)

<https://ifr.org/ifr-press-releases/news/top-5-global-robotics-trends-2025>

<https://ifr.org/worldrobotics>

<https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2025/04/04/AI-and-Productivity-in-Europe-565924>

<https://www.intereconomics.eu/contents/year/2025/number/3/article/better-regulation-and-the-eu-s-artificial-intelligence>

<https://www.istat.it/informazioni-sulla-rilevazione/ict-imprese/>

<https://www.istat.it/tag/ict-nelle-imprese/>

<https://www.istat.it/tag/cittadini-imprese-e-ict/>

<https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/time-to-place-our-bets-europes-ai-opportunity>

<https://www.oecd.org/en/topics/digital.html>

<https://www.oecd.org/en/topics/employment.html>

<https://www.oecd.org/en/topics/industry-business-and-entrepreneurship.html>

<https://www.oecd.org/en/topics/industry-business-and-entrepreneurship.html>

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC>

<https://www.tesla.com/AI>

<https://www.astm.org/>

[https://reports.weforum.org/docs/WEF\\_Future\\_of\\_Jobs\\_Report\\_2025.pdf](https://reports.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs_Report_2025.pdf)

<https://www.weforum.org/>

<https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2023/>

<https://worldmanufacturing.org/activities/world-manufacturing-forum-2025>