



Data di ricezione: 30.05.25 / Data accettazione: 07.08.25 / Data di pubblicazione: 18.11.25
doi: 10.82015/NNR.2025.100103

Industria avanzata e intelligenza artificiale: un nuovo paradigma per competitività, sostenibilità e valore

Advanced Industry and Artificial Intelligence: A New Paradigm for Competitiveness, Sustainability, and Value

Andrea Santoni¹

Sintesi

L'intelligenza artificiale (IA) sta ridefinendo i paradigmi dell'industria avanzata, imponendosi come fattore chiave per la competitività in un contesto globale segnato da incertezza e trasformazioni rapide. Realizzato nel contesto del 1° Congresso Nazionale dell'Ente Nazionale per l'Intelligenza Artificiale (ENIA) "L'Economia dell'IA: Ricchezza, Regole e Rigenerazione", l'articolo approfondisce alcuni degli impatti specifici dell'IA sull'industria avanzata per la quale E.N.I.A. ha istituito un'apposita Commissione. L'Italia, pur vantando una solida tradizione industriale manifatturiera, è chiamata a colmare significativi ritardi nell'adozione di tecnologie digitali e nella valorizzazione del dato. In questo articolo, si analizzano le applicazioni concrete dell'IA e i potenziali benefici in termini di efficienza, resilienza e adattabilità delle filiere. Si discutono inoltre le sfide associate a questo cambiamento, a partire dalla necessità di nuovi modelli organizzativi e di partnership tra pubblico, privato e ricerca, proponendo le direttrici strategiche per una trasformazione sistemica e inclusiva.

¹ Executive manager nel settore ICT. In qualità di COO, si occupa di organizzazione e pianificazione strategica in Sealence SB Spa, PMI innovativa nel settore delle propulsioni navali elettriche. Membro del board tecnico-scientifico di E.N.I.A. e Coordinatore della Commissione per la promozione dell'industria avanzata, guida l'adozione etica dell'IA; E-mail: andrea.santoni@enia.ai.



Parole chiave: Intelligenza Artificiale; Industria; Innovazione; Competitività; Digitalizzazione.

Abstract

Artificial intelligence is redefining the paradigms of advanced industry, establishing itself as a key factor for competitiveness in a global context marked by uncertainty and rapid transformations. Within the framework of the 1st National Congress of E.N.I.A., titled “The AI Economy: Wealth, Rules, and Regeneration,” this research examines specific impacts of artificial intelligence on Advanced Industry, for which E.N.I.A. has established a dedicated Commission. Although Italy boasts a strong manufacturing tradition, it faces significant delays in adopting digital technologies and leveraging data value. This study analyzes concrete AI applications, highlighting benefits in efficiency, resilience, and adaptability across supply chains. Furthermore, it addresses the main challenges, the need for new organizational models, and the central role of partnerships among public institutions, private sector, and research entities, proposing strategic directions for systemic and inclusive transformation.

Keywords: Artificial Intelligence; Industry; Innovation; Competitiveness; Digitalization.



1. Introduzione

L'attuale fase di evoluzione economica e tecnologica rappresenta una delle trasformazioni più radicali degli ultimi decenni. In un contesto globale caratterizzato da dinamiche geopolitiche incerte, tensioni sulle catene di fornitura, transizione energetica e trasformazione digitale, l'intelligenza artificiale (d'ora in poi IA) si sta affermando come una delle variabili decisive per definire la competitività futura delle imprese e delle economie nazionali.

La definizione di sistema di IA non è univoca e si presta a varie interpretazioni e declinazioni, in quanto incide su molteplici aspetti non solo tecnologici. Pragmaticamente si può fare riferimento a due definizioni che, più di altre, si adattano al contesto nel quale si muoverà la presente analisi.

Per la prima definizione attingiamo all'AI Act², del Consiglio e del Parlamento europeo, il regolamento che istituisce un quadro normativo armonizzato per lo sviluppo, la commercializzazione e l'uso dei sistemi di intelligenza artificiale nell'UE. L'AI Act, riprende la definizione di IA proposta dall'OCSE/OECD (Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico) e la descrive come segue: *“Un sistema di intelligenza artificiale (sistema di IA) è un sistema progettato per operare con diversi livelli di autonomia e che può mostrare adattabilità dopo la messa in servizio, e che, per obiettivi espliciti o impliciti, deduce, da input ricevuti, come generare output quali previsioni, raccomandazioni o decisioni che possono influenzare ambienti fisici o virtuali”*.

La seconda definizione deriva da quanto previsto dalla norma ISO/IEC 42001:2023, che definisce un sistema di IA come un *“sistema progettato per operare con diversi livelli di autonomia al fine di raggiungere obiettivi specifici percependo il proprio ambiente tramite acquisizione di dati, interpretando i dati raccolti (strutturati o non strutturati),*

² Regolamento (UE) 2024/1689 del 13 giugno 2024, che stabilisce regole armonizzate sull'intelligenza artificiale: <https://shorturl.at/OM7qS>. Si veda anche: Recommendation of the Council on Artificial Intelligence (OECD/LEGAL/0449), adottata il 22 maggio 2019 e aggiornata l'8 novembre 2023: <https://shorturl.at/Eju99>.



ragionando sulle conoscenze o elaborando le informazioni derivate da tali dati e decidendo le azioni migliori da intraprendere per raggiungere l'obiettivo prefissato. I sistemi di IA possono anche apprendere a adattare il proprio comportamento analizzando come l'ambiente viene influenzato dalle azioni precedenti”.

L'AI Act e la normativa ISO/IEC 42001:2023 sono strumenti complementari dove il primo impone obblighi legali, mentre la seconda offre una struttura gestionale e operativa.

Come si può facilmente intuire, l'IA quindi non va intesa soltanto come una tecnologia abilitante, ma come un nuovo paradigma economico che ridefinisce strutturalmente il concetto di valore nell'industria, modifica le basi della produzione, trasforma la natura degli asset aziendali e introduce logiche di efficienza, previsione e personalizzazione finora inaccessibili.

Nell'ambito del 1° Congresso dell'Ente Nazionale per l'Intelligenza Artificiale (ENIA) *“L'Economia dell'AI: Ricchezza, Regole e Rigenerazione”*, la presente ricerca ha inteso approfondire le modalità attraverso cui l'industria avanzata³ può trasformare l'economia e rafforzare la propria competitività e sostenibilità.

La competitività oggi non si gioca più solo sulla qualità del prodotto, ma sulla capacità di generare valore partendo da dati e dalla loro fruibilità all'interno di ecosistemi. Si pensi, ad esempio, a come la Germania abbia costruito una strategia industriale fondata su ecosistemi digitali integrati, o a come la Corea del Sud stia investendo massicciamente nella progettazione ed utilizzo di gemelli digitali.

³ L'industria avanzata, spesso chiamata anche Industria 4.0, industria intelligente o smart manufacturing, rappresenta una trasformazione radicale del settore manifatturiero, caratterizzata dall'integrazione di tecnologie digitali avanzate nei processi produttivi. Questo include l'utilizzo di Internet of Things (IoT), intelligenza artificiale (IA), robotica avanzata, analisi dei big data e cloud computing. L'obiettivo è creare sistemi di produzione più efficienti, flessibili, interconnessi e automatizzati, capaci di rispondere rapidamente alle esigenze del mercato e migliorare la produttività e la qualità dei prodotti. Diventa centrale la Fabbrica intelligente (Smart Factory) dove l'utilizzo di tecnologie digitali permette di monitorare i processi fisici, prendere decisioni decentralizzate e ottimizzare l'uso delle risorse.



L'Italia parte da una posizione meno favorevole: il nostro Paese ha una solida tradizione industriale, ma fatica ad abbracciare il digitale e la cultura del dato come asset strategico nel contesto competitivo contemporaneo (Andreani et al. 2025; Andreani et al. 2021).

In questo scenario, il ruolo della Commissione per la promozione dell'industria avanzata di ENIA è quello di osservare e accompagnare questo cambiamento, creare connessioni tra settori (pubblico, privato e ricerca), e facilitare l'adozione di strategie che consentano al sistema produttivo nazionale di cogliere pienamente le opportunità offerte dall'IA, coniugando innovazione, inclusività e sostenibilità.

Prima di proseguire, è utile ricordare un principio essenziale: nessuna architettura di IA può esistere senza una base solida di digitalizzazione, accesso ai dati e cultura d'impresa *data-driven*. Affinché l'IA funzioni correttamente e sia in grado di esprimere il proprio potenziale, sarà necessario tracciare digitalmente i processi organizzativi e assicurare la qualità dei dati acquisiti. Sarebbe come progettare un motore di ultima generazione senza avere delle strade da percorrere e del carburante per farlo. Ecco perché dati e digitale sono condizioni abilitanti, non opzionali, per ogni applicazione di IA.

Il dato - qui inteso nel senso più ampio e comprensivo dei processi associati (es. documentazione di processi, procedure, norme o regole aziendali, dati finanziari ed economici, dati relativi alla gestione del personale, della formazione, delle performances, supporti audio-video, dati raccolti tramite sensoristica, sonde, ecc.) - è parte del know-how aziendale e da esso dipende la stessa sopravvivenza delle imprese.

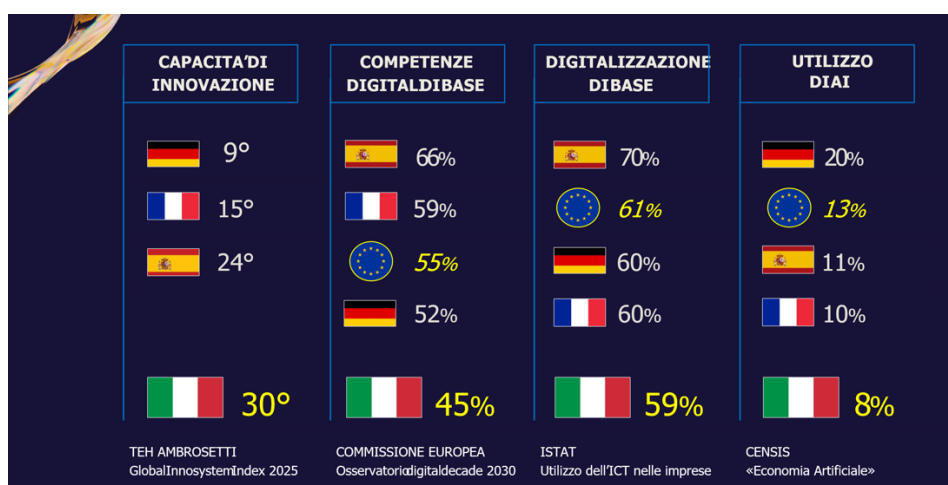
1.1. L'Italia e la digitalizzazione

A partire da queste premesse, si vuole in questo capitolo analizzare il contesto italiano, rispetto a quello europeo, mettendo a confronto quattro indici la cui lettura integrata restituisce un'istantanea del livello di innovazione e digitalizzazione del Paese (Fig. 1).



Per quanto riguarda la capacità di innovazione si fa riferimento al *Global Innosystem Index 2025*⁴ che valuta cinque dimensioni chiave: capitale umano, risorse finanziarie, innovatività dell'ecosistema, efficacia dell'ecosistema, attrattività per talenti e capitali.

Figura 1
L'Italia e la digitalizzazione



Fonte: *Global Innosystem Index 2025 (TEHA)*, *Digital Decade 2030 (Osservatorio UE)*, *Rilevazione sull'utilizzo dell'ICT nelle imprese (ISTAT)*, *«Economia Artificiale. Esposizione del mondo del lavoro e delle imprese alla diffusione dell'IA» (CENSIS)*

Secondo tale indice, l'Italia si posiziona al 30° posto su 47 paesi con un punteggio di 68,7 rispetto a 74,7 della Spagna, 81,5 della Francia, 87,9 della Germania e 100 degli Stati Uniti.

Un secondo indice significativo da analizzare è quello relativo alla diffusione delle competenze digitali di base, fornito dall'osservatorio *Digital Decade 2030*⁵ dell'Unione europea, un programma strategico che definisce gli obiettivi digitali che gli Stati membri dovranno raggiungere entro il 2030. Attraverso questo programma, l'Unione punta a diventare un leader globale nella transizione digitale, con l'obiettivo di creare una

⁴ The European House Ambrosetti (2025). InnoTech Report 2025: <https://shorturl.at/WEIBz>.

⁵ Commissione Europea (2021). Manifesto per la Digital Decade 2030: <https://shorturl.at/si2qj>.



società e un'economia che siano inclusive, sostenibili e resilienti. La commissione Europea ha sviluppato l'indicatore DESI (*Digital Economy and Society Index*)⁶ per misurare il grado di digitalizzazione dei Paesi membri lungo quattro dimensioni: connettività, capitale umano, integrazione delle tecnologie digitali nelle imprese, servizi pubblici e digitali. Stando all'ultimo report, solo il 45,8% degli italiani tra i 16 e i 74 anni possiede competenze digitali di base, contro una media UE del 55,5% e Paesi di confronto come Germania 52%, Francia 59% e Spagna 66%.

Va qui sottolineato con forza che gli imprenditori, i manager e tutti coloro che operano in azienda sono, prima ancora che lavoratori, cittadini. Pertanto, le lacune legate ad un basso livello di digitalizzazione dei cittadini si riflettono inevitabilmente anche sul mondo delle imprese. Perciò, per apportare miglioramenti, bisogna agire a monte con informazione e formazione sulla digitalizzazione di base (Van Laar et al. 2020; Van Laar et al. 2017).

Il terzo indice misura il livello di digitalizzazione delle imprese e viene fornito dallo studio ISTAT «*Rilevazione sull'utilizzo dell'ICT nelle imprese*»⁷. L'Italia si colloca alla ventesima posizione fra i 27 Paesi europei, con un valore pari al 59% rispetto alla media UE del 61% (Germania e Francia 60%, Spagna 70%).

Il report «*Economia Artificiale. Esposizione del mondo del lavoro e delle imprese alla diffusione dell'IA*»⁸ curato dal CENSIS misura e discute l'utilizzo di IA nelle imprese. Emerge un divario marcato fra le imprese italiane, fra le quali soltantol'8% utilizza l'IA, e la media Ue, che si attesta al 13,5% (Francia 10%, Spagna 11%, Germania 20%). Allo stesso tempo, il Report mette in evidenza un divario profondo tra le grandi imprese (32,5%) e le PMI (7,7%) nell'adozione di queste tecnologie.

⁶ Commissione Europea. DESI indicators (2025):

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

⁷ ISTAT (2025). Rilevazione sull'utilizzo dell'ICT nelle imprese:

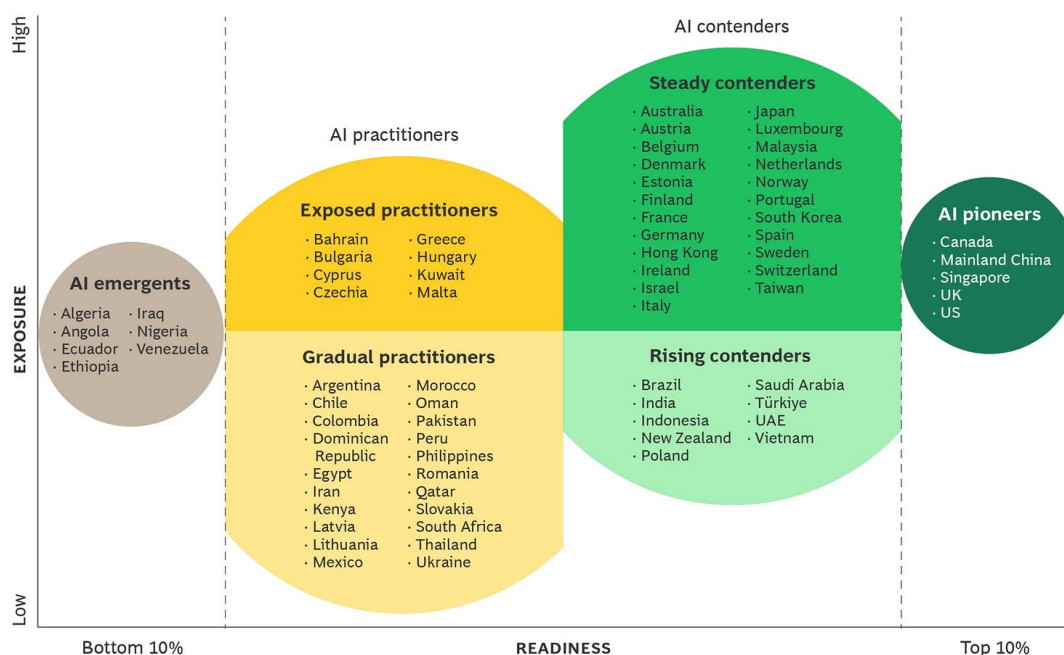
<https://www.istat.it/wp-content/uploads/2025/01/Statreport ICT2024-1.pdf>

⁸ CENSIS (2025). Economia Artificiale. Esposizione del mondo del lavoro e delle imprese alla diffusione dell'IA. <https://www.censis.it/economia/focus-censisconcooperative>.



I dati qui ripresi ci informano del grado di ritardo dell'Italia nella trasformazione digitale e nell'adozione dell'IA, ma si tratta di un divario che può essere recuperato. Secondo le rilevazioni del Boston Consulting Group⁹, l'Italia – insieme a Germania, Francia, Spagna e altre realtà extra-europee tra cui Giappone, Israele e Australia – rientrerebbe nella categoria dei paesi *AI Contenders* (Fig. 2), ovvero nel quadrante alto della matrice, dove si trovano le economie che presentano una significativa esposizione ai potenziali impatti dell'IA e un sufficiente livello di preparazione per l'adozione dell'IA e la mitigazione dei pericoli associati.

Figura 2
Distribuzione delle economie per archetipi di adozione dell'intelligenza artificiale



Fonte: Boston Consulting Group - "The AI Maturity Matrix" (novembre 2024)

Senza un cambio di prospettiva, le imprese italiane rischiano di diventare fornitori di

⁹ Boston Consulting Group (2024). The AI Maturity Matrix:
<https://web-assets.bcg.com/fe/61/6962e74b44328f148c8a9ac1002d/ai-maturity-matrix-nov-2024.pdf>.



produzione, lasciando che la quota più consistente di valore economico venga catturata da chi ha sviluppato una maggiore capacità nella gestione dei dati e di conseguenza nella gestione di prodotti, clienti, fornitori, processi di produzione, target di mercato e di tutte le altre principali dimensioni dell'attività economica di un'impresa. Per comprendere come colmare questo divario e riconquistare una posizione competitiva, è necessario analizzare in che modo l'intelligenza artificiale possa concretamente contribuire alla trasformazione dei modelli produttivi, offrendo nuove opportunità in termini di efficienza, personalizzazione, sostenibilità e adattabilità delle filiere industriali.

2. Il contributo dell'intelligenza artificiale alla produzione industriale

L'industria avanzata sta cambiando profondamente. L'automazione e la digitalizzazione stanno trasformando la produzione industriale in un ecosistema intelligente, dove la gestione di enormi volumi di dati sta abilitando valutazioni predittive e decisioni strategiche, migliorando efficienza, produttività e resilienza delle imprese (Zong e Guan 2025; Mathew, Brintha, e Jappes 2023).

I paragrafi seguenti analizzano in dettaglio gli effetti già osservabili in questa fase evidenziando in particolare un significativo avanzamento nei livelli di ottimizzazione e di personalizzazione dei processi produttivi, un miglioramento della sostenibilità industriale e un approccio più flessibile e adattabile al controllo della filiera. Questi fattori consentono alle aziende di acquisire un vantaggio competitivo duraturo.

2.1. Ottimizzazione e personalizzazione della produzione

L'integrazione dell'IA nei contesti produttivi interviene su due direttrici fondamentali: l'ottimizzazione dei processi operativi e la personalizzazione dei prodotti.

L'adozione di tecnologie intelligenti consente da un lato una gestione più efficiente,



flessibile e predittiva delle attività industriali, e dall'altro l'evoluzione verso modelli di produzione su misura, sostenibili e scalabili, capaci di rispondere in modo proattivo alla domanda individuale dei consumatori.

La gestione più precisa e reattiva delle attività industriali consente di migliorare l'efficienza operativa, supporta la pianificazione e l'esecuzione dei cicli di produzione anticipando i guasti attraverso modelli predittivi e riducendo i tempi di inattività degli impianti (Waltersmann et al. 2021; Peres et al. 2020). I sistemi di controllo in tempo reale permettono anche di mantenere elevati standard qualitativi e adattare rapidamente la produzione alle variazioni della domanda (Iannino 2021; Wan et al. 2021). Il risultato è una gestione continua e affidabile delle linee produttive, in grado di rispondere con maggiore tempestività alle esigenze di mercato.

Le *digital twin* sono esempi concreti di applicazione delle tecnologie intelligenti; esse consistono in repliche digitali dinamiche e interattive di impianti produttivi o sistemi complessi, create per rappresentare accuratamente lo stato e il funzionamento della loro controparte fisica. Questi modelli virtuali si aggiornano continuamente con dati reali provenienti da sensori, permettendo di monitorare, analizzare e simulare il comportamento del sistema in tempo reale durante tutto il suo ciclo di vita (Singh et al. 2022; Opoku et al. 2021). Altri esempi sono i progetti *Zero man on the floor* per lo sviluppo di impianti completamente automatizzati e gestiti tramite l'IA, senza che sia necessario un intervento umano diretto. A conclusione di questa breve rassegna, si menzionano gli impieghi nella cantieristica navale, dove le tecnologie intelligenti monitorano e ottimizzano l'operatività delle navi anche dopo il varo, migliorando la manutenzione e le prestazioni in base alle specifiche esigenze del cliente.

In secondo luogo, l'IA sta ulteriormente rafforzando la personalizzazione della produzione, ovvero la capacità di realizzare prodotti che rispondono in modo specifico alle esigenze individuali dei clienti, superando il modello tradizionale di produzione di massa in cui tutti gli articoli sono identici (Gabsi 2024). Questo approccio consente di combinare i vantaggi della produzione su larga scala, quali efficienza e costi contenuti,



con la flessibilità necessaria per offrire soluzioni su misura. La produzione personalizzata implica tempi di realizzazione più lunghi e costi elevati, dovuti alla necessità di adattare manualmente ogni prodotto, ma l'introduzione delle tecnologie avanzate ha reso possibile l'adozione di nuovi modelli produttivi di *mass customization*, in cui la personalizzazione viene integrata nei processi produttivi automatizzati e scalabili (Zawadzki e Żywicki 2016)¹⁰.

La trasformazione intelligente rappresenta un elemento di accelerazione che fa evolvere e migliora il modello di *mass customization* rendendo possibile una personalizzazione su larga scala efficiente, rapida e sostenibile consentendo l'analisi di enormi volumi di dati sulle preferenze dei clienti e traducendoli in istruzioni operative precise che guidano la produzione in tempo reale. I modelli predittivi e gli algoritmi di machine learning mettono le aziende nella condizione di anticipare la domanda, ottimizzare la progettazione personalizzata dei prodotti e adattare rapidamente le linee produttive alle esigenze individuali, mantenendo al contempo i vantaggi della produzione di massa.

2.2. Sostenibilità industriale

La capacità di ridurre gli sprechi, ovvero di individuare e correggere le inefficienze nell'utilizzo di energia e materiali lungo il ciclo produttivo rientra fra le più significative applicazioni delle tecnologie intelligenti alla produzione industriale.

Un esempio di come l'IA si rivela uno strumento essenziale per la sostenibilità e per la transizione ecologica, lo si trova nella gestione dei rifiuti dove riduce l'impatto delle attività umane sull'ambiente (Fang et al. 2023). Questa tecnologia consente infatti di sviluppare modelli di gestione dei rifiuti sostenibili, puntando a un'economia circolare che consideri fattori ambientali, economici e sociali. L'IA ottimizza la logistica dei rifiuti,

¹⁰ La *mass customization* nasce come concetto negli anni '80, ma si afferma e si diffonde soprattutto negli anni '90. Questo modello si basa sulla progettazione modulare dei prodotti, che consente di assemblare componenti standard in configurazioni diverse, e sull'utilizzo di sistemi digitali per raccogliere e analizzare le preferenze dei clienti.



abbattendo le distanze di trasporto fino al 36.8%, con conseguenti significativi risparmi sui costi e sui tempi, riducendo così le emissioni. La sua capacità di identificare e smistare i rifiuti con un'elevata accuratezza, che varia dal 72.8% al 99.95%, è cruciale per massimizzare il riciclo e il recupero di risorse preziose. Attraverso l'implementazione di sistemi di bidoni intelligenti e robot di smistamento si incrementa l'efficienza della raccolta e della classificazione, minimizzando la contaminazione e gli sprechi. Inoltre, supporta la conversione dei rifiuti in energia, come la produzione di biogas da scarti organici, e la previsione accurata della generazione di rifiuti, permettendo una pianificazione più efficace e una minore dispersione. L'IA contribuisce anche a individuare e ridurre lo smaltimento illegale, salvaguardando gli ecosistemi. Tutto ciò porta ad un aumento dell'efficienza operativa ed alla riduzione dei costi.

Un altro aspetto importante di sostenibilità industriale, indotta dall'utilizzo dell'IA, consiste nel migliorare l'impiego delle risorse. In questo la manifattura additiva è un esempio concreto e, in particolare, nella stampa 3D (Paraskevoudis, Karayannis e Koumoulos 2020). I difetti di stampa sono problematiche comuni che possono portare a un considerevole spreco di materiale, energia e tempo di operatività delle apparecchiature, oltre a causare potenziali malfunzionamenti come l'otturazione degli ugelli. L'integrazione di reti neurali profonde, basate sulla Computer Vision, permette il rilevamento in tempo reale dei difetti durante il processo di stampa, analizzando il feed video. Questa capacità di identificazione precoce è cruciale, poiché consente al sistema intelligente di intervenire in modo tempestivo; il sistema può infatti terminare il processo di stampa o suggerire correzioni ai parametri correlati al difetto identificato. Tale approccio riduce drasticamente lo spreco di materie prime e di energia, minimizzando i costi e il tempo di inattività. Inoltre, l'automazione del monitoraggio limita la necessità di supervisione umana costante, liberando gli operatori e migliorando la sicurezza. La previsione e prevenzione dei difetti tramite IA contribuisce così a un utilizzo più efficiente e sostenibile delle risorse nell'intero ciclo produttivo. Da questo punto di vista, le tecnologie di Machine Learning (ML) e Deep Learning (DL)



sono fondamentali per favorire la transizione ecologica nelle aziende, in quanto, oltre a migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse, riducono anche gli sprechi energetici (Kotsiopoulos et al. 2021). Attraverso l'analisi di enormi volumi di dati generati dai sensori dell'Industria 4.0, queste tecnologie permettono di estrarre conoscenze preziose sullo stato delle apparecchiature e dei processi produttivi, un fattore cruciale per migliorare l'utilizzo delle risorse. L'applicazione dell'IA si manifesta concretamente nella manutenzione predittiva, dove algoritmi di ML e DL prevedono la vita utile residua dei macchinari e diagnosticano precocemente i guasti, riducendo interruzioni, sprechi di materiali e il consumo energetico derivante da riparazioni inattese o inefficienze. Il paradigma delle Smart Grid è un esempio lampante di come i sistemi intelligenti ottimizzino l'efficienza energetica e riducano l'impronta ambientale. Modelli predittivi avanzati stimano con elevata accuratezza i carichi energetici, consentendo una gestione ottimale della generazione e distribuzione dell'elettricità, prevenendo la sovrapproduzione e le perdite. L'IA contribuisce anche al rilevamento delle frodi energetiche e all'ottimizzazione della stabilità del sistema, garantendo un utilizzo delle risorse più consapevole e meno dispendioso. Alcuni studi hanno associato l'implementazione sistemica delle tecnologie intelligenti a una sensibile riduzione dei consumi energetici (fino al 30%) nei processi produttivi, una riduzione dei materiali utilizzati (fino al 15%) e delle emissioni di Co2 (tra il 10% e il 30% in relazione ai diversi comparti produttivi)¹¹.

Va qui sottolineato che implementare politiche di sostenibilità nella produzione, attraverso l'utilizzo di sistemi intelligenti, consente alle aziende di poter accedere a linee di credito dedicate. In un'epoca in cui l'urgenza dell'azione climatica è prioritaria, infatti, le istituzioni finanziarie stanno progressivamente incorporando la sostenibilità della controparte nella valutazione del credito. Questo avviene attraverso l'integrazione

¹¹ World Economic Forum, L'impatto dell'Industria 4.0 sulla sostenibilità: <https://www.weforum.org/>; Siemens, Automazione e gestione sostenibile dell'energia: <https://www.siemens.com/>; McKinsey and Company, Digitalizzazione e sostenibilità nel settore manifatturiero: <https://www.mckinsey.com/>; Agenda Digitale, Automazione industriale e riduzione delle emissioni: <https://www.agendadigitale.eu/>.



di punteggi Ambientali, Sociali e di Governance (ESG) nei modelli di *credit scoring* (Schmitt e Cummins 2023). Tali punteggi, infatti, offrono una valutazione più olistica del rischio di credito, andando oltre i parametri finanziari tradizionali per includere l'impatto ambientale dell'azienda, la sua responsabilità sociale e gli standard di governance. Includere la sostenibilità e l'efficienza energetica nei modelli di *credit scoring* aiuta a identificare mutuatari finanziariamente responsabili e resilienti, promuovendo al contempo un'economia più sostenibile e attenta all'ambiente. Questo approccio consente alle aziende con solide credenziali di sostenibilità di essere percepite come soggetti a minor rischio, migliorando così le loro prospettive di accesso a finanziamenti.

In ultima istanza si può notare come, in tutti gli esempi citati, l'integrazione di sistemi di intelligenti nel ciclo produttivo favorisce una gestione più efficiente e un'allocazione ottimizzata dei costi operativi, con conseguenti riduzioni significative. Tali benefici derivano sia dalle efficienze generate lungo l'intera filiera produttiva, sia dalla possibilità di attuare interventi manutentivi predittivi, in grado di prevenire fermi impianto causati da guasti.

In definitiva, l'adozione diffusa dell'intelligenza artificiale rappresenta un elemento chiave per realizzare una sostenibilità industriale concreta e misurabile, capace di integrare efficienza operativa, riduzione dell'impatto ambientale e accesso a nuovi strumenti di finanziamento responsabile.

2.3. Adattabilità e controllo della filiera

L'introduzione di tecnologie intelligenti consente alle aziende di affrontare le sfide del mercato in modo strutturato agendo alternativamente, o in combinazione, su due piani distinti: quello tattico, con lo scopo di risolvere urgenze e situazioni contingenti nel breve termine, e quello strategico, che pianifica soluzioni di medio-lungo periodo.

Le capacità dell'IA, nel primo caso, permettono di modellare la produzione in tempo



reale adattandola in modo rapido e flessibile grazie a decisioni *data-driven* ed alla maggiore precisione di gestione dei flussi, dei fornitori, della logistica e dell'intera *supply chain*. La capacità dell'impresa di reagire e adattarsi tempestivamente, e in modo consapevole, diventa utile nel preservare il proprio vantaggio competitivo e l'efficienza dei processi in un contesto politico, economico e sociale altamente instabile come quello attuale, minacciato da sconvolgimenti geo-politici, disastri naturali, emergenze sanitarie e variazioni nell'andamento del mercato.

Contestualmente, le tecnologie di machine learning e di deeplearning, supportano l'attuazione del piano strategico aziendale, grazie alla loro capacità di simulare e prevedere scenari futuri. Ciò consente una pianificazione più efficace degli investimenti e della produzione, orientata a un orizzonte temporale di medio-lungo termine caratterizzato da maggiore stabilità (Grant 2021; Kotsiopoulos et al. 2021).

3. Intelligenza artificiale, valore economico e territorio

Nel presente paragrafo si discute il collegamento fra l'adozione di soluzioni basate sull'IA, la creazione di valore economico e le implicazioni per il territorio.

Le tecnologie intelligenti rappresentano uno dei principali strumenti in grado di abilitare la generazione di valore economico nell'ambito della produzione industriale. Tuttavia, la sua efficacia dipende dalla capacità delle imprese di evolvere in modo coerente rispetto a tre dimensioni interconnesse: (i) la valorizzazione strategica dei dati; (ii) la costruzione di una maggiore resilienza industriale; (iii) l'integrazione della sostenibilità come leva per la competitività.

Alla base di questa trasformazione si pone la necessità di disporre di dati di alta qualità, accessibili e interoperabili, non solo per garantire il corretto funzionamento degli algoritmi, ma anche per rendere i processi decisionali più informati, tempestivi e trasparenti (Liu et al. 2021; Raptis, Passarella e Conti 2019; Zeid et al. 2019; Nagorny et al. 2017). La costruzione di ecosistemi digitali orientati alla condivisione e alla



collaborazione tra attori pubblici e privati, si configura dunque come condizione abilitante essenziale per lo sviluppo e l'adozione dell'IA su larga scala a vantaggio di tutti (Brogaard 2019).

Nel contesto globale contemporaneo, segnato da instabilità geopolitiche, crisi sanitarie e transizioni tecnologiche rapide, gli strumenti di IA si affermano per aumentare la capacità delle imprese di adattarsi e reagire a eventi imprevisti. Il rafforzamento della resilienza industriale, anche attraverso modelli di reshoring intelligente e supply chain digitali, diventa così una componente strategica per garantire continuità operativa e competitività (Birkel e Müller 2025; Sorokina e Lebedeva 2025). L'IA consente, infine, di affrontare in modo più efficace le sfide ambientali, migliorando l'efficienza energetica, riducendo gli sprechi e promuovendo pratiche industriali circolari aprendo così anche nuove opportunità economiche per le imprese che sanno integrare innovazione e sostenibilità nel proprio modello di sviluppo (Hernandez et al. 2025; Farmanesh et al. 2025; Sashikala et al. 2025).

3.1. Il dato come asset strategico

I dati rappresentano la risorsa abilitante fondamentale per qualsiasi applicazione di intelligenza artificiale. Emergono di conseguenza le questioni della disponibilità, della qualità e della gestione dei dati (Zha et al. 2025; Pahune et al. 2025; Rathore et al. 2021). Il paragrafo esplora alcune dimensioni fondamentali della trasformazione dei dati industriali in un asset strategico, come la necessità di disporre di dataset affidabili e rappresentativi, l'urgenza di promuovere la diffusione della cultura del dato, e l'importanza di costruire ecosistemi digitali collaborativi che permettano di valorizzare i dati disponibili in modo sistemico.

L'efficacia delle soluzioni basate sull'IA dipende dalla quantità e qualità dei dati utilizzati per addestrare le macchine e supportarne il funzionamento. Dati insufficienti, inaccurati, incompleti, destrutturati o non rappresentativi possono compromettere la



precisione e l'affidabilità delle previsioni e delle decisioni generate dall'IA, portando a risultati errati o fuorvianti (Jan et al. 2023; Jagatheesaperumal et al. 2021). La qualità dei dati si misura attraverso parametri come accuratezza, completezza, coerenza, tempestività e accessibilità. Garantire dataset di dati aziendali sufficientemente grandi e di alta qualità significa disporre di informazioni fedeli alla realtà, prive di errori e aggiornate, che permettono agli algoritmi di apprendere efficacemente e di fornire output affidabili e utili. La qualità dei dati rappresenta quindi il fondamento imprescindibile per il successo di qualsiasi progetto di IA, tanto da essere considerata la principale barriera all'adozione diffusa di soluzioni di IA, sia generativa che narrow, insieme alla mancanza di competenze adeguate (skill mismatch) (Paško et al. 2022; Johnson et al. 2021).

La seconda dimensione, per trasformare i dati industriali in un asset strategico, afferisce alla possibilità e capacità di accedervi. Nonostante la crescente importanza dei dati, il contesto italiano presenta ancora significative criticità legate alla disponibilità, affidabilità e gestione dei dati industriali. Soprattutto le PMI mancano di una cultura data-driven consolidata, ovvero di una capacità di raccogliere, analizzare e utilizzare i dati per supportare i processi organizzativi e decisionali (Andreani et al. 2025; Paoloni, Manzo e Procacci 2023; Bettiol et al. 2021; Celant e Pustokhina 2020). L'accesso ai dati industriali si presenta ulteriormente ostacolato da silos informativi e culturali, mancanza di infrastrutture adeguate e preoccupazioni legate alla privacy e alla sicurezza. Risulta così limitata la capacità delle aziende italiane di sviluppare e adottare soluzioni IA avanzate, riducendo la competitività del sistema produttivo nazionale nel contesto globale.

La trattazione ci porta alla terza fondamentale dimensione, ovvero alla costruzione di ecosistemi di dati condivisi, basati su infrastrutture digitali sicure, interoperabili e orientate alla collaborazione tra imprese, centri di ricerca e istituzioni (Gröger 2021; Cui, Kara e Chan (2020).



Gli ecosistemi permettono di aggregare e valorizzare dati di qualità, favorendo l'innovazione e la competitività attraverso l'accesso a informazioni più ricche e diversificate. L'Europa si sta già muovendo in questa direzione. Lo scorso 9 aprile 2025 è stato pubblicato il documento *AI Continent Action Plan*¹² della Commissione Europea, nato dalla collaborazione tra istituzioni UE, stati membri, università, startup e grandi infrastrutture computazionali attraverso EuroHPC, iniziativa congiunta dell'UE per il supercalcolo avanzato.

L'obiettivo del piano è di accelerare lo sviluppo e l'adozione dell'IA da parte degli Stati membri, rafforzandone la competitività e l'autonomia strategica dell'Unione a livello globale. Si articola su cinque pilastri fondamentali: infrastrutture di calcolo, accesso a dati di alta qualità, innovazione e adozione strategica dell'IA, sviluppo di competenze e talenti, e semplificazione normativa.

Il principale proposito del piano consiste nella costruzione di un ecosistema connesso, integrato e interdipendente, dove ogni attore, dalle startup alle università, dai centri di ricerca alle pubbliche amministrazioni, partecipa attivamente alla co-creazione del valore.

I nodi strategici di questo ecosistema sono le *AI factories*: spazi fisici e digitali in cui si uniscono potenza computazionale, competenze e dati per sviluppare soluzioni di IA avanzate a beneficio di tutta la UE¹³. In questo contesto, i dati sono l'infrastruttura centrale che rende possibile l'innovazione. I dati, provenienti da sanità, industria, energia, linguistica, ricerca, saranno accessibili in ambienti sicuri e standardizzati, anche in cloud, promuovendo così una reale condivisione intersettoriale e transnazionale, gettando le basi per un sistema di interoperabilità dei dati che supera le attuali frammentazioni settoriali e territoriali.

Questo modello deve essere perseguito anche in Italia, per promuovere l'innovazione e recuperare la competitività delle proprie imprese, attraverso la definizione di modelli di

¹² Commissione Europea - "AI Continent Action Plan" (aprile 2025): <https://shorturl.at/dSefz>.

¹³ Commissione Europea: <https://shorturl.at/T4nkg>; European Parliament: <https://shorturl.at/wAi32>; Agenzia per la Promozione della Ricerca Europea: <https://shorturl.at/Dnmjj>.



governance chiari e trasparenti, adatti a garantire la protezione della privacy, la sicurezza dei dati e la conformità alle normative europee in materia.

È essenziale costruire fiducia e incentivare la partecipazione attiva degli attori coinvolti. Solo in questo modo, i dati industriali possono diventare un vero e proprio asset strategico, abilitando lo sviluppo di soluzioni IA più efficaci, responsabili e sostenibili.

3.2. Rendere l'industria più resiliente

La resilienza di una impresa è la sua capacità di adattarsi, resistere e riprendersi efficacemente da eventi imprevedibili, crisi o cambiamenti repentini nel contesto economico, tecnologico e geopolitico (Xiao e Cao 2017). In un mondo caratterizzato da tensioni sulle catene di fornitura, instabilità geopolitica e rapida evoluzione tecnologica, la resilienza industriale diventa un fattore cruciale per garantire la continuità operativa, la competitività e la sostenibilità a lungo termine. Rendere l'industria più resiliente significa dotarsi di strumenti tecnologici e organizzativi che permettano di anticipare e gestire efficacemente le crisi, riducendo la vulnerabilità delle catene di approvvigionamento e migliorando la capacità di innovare e competere in un mercato globale sempre più complesso.

Le soluzioni basate sull'IA hanno il potenziale di rafforzare questa resilienza, offrendo strumenti avanzati per la gestione predittiva, l'ottimizzazione dei processi e la capacità di risposta rapida ai cambiamenti (Smyth et al. 2024; Mao, Zhang e Tang 2021). In particolare, le tecnologie intelligenti possono abilitare una visibilità *end-to-end* della supply chain, integrando informazioni da diverse funzioni aziendali e partner esterni per una gestione coordinata e adattativa in modo da ottimizzare la pianificazione della produzione. Elemento strategico di aumento della resilienza è il cosiddetto «*reshoring intelligente*» (Akkan 2025), ovvero il ritorno delle attività produttive nel paese d'origine o in aree più vicine, supportato dall'adozione delle tecnologie disponibili più avanzate. In questo modo, si riduce la dipendenza da catene di fornitura globali spesso lunghe,



complesse e vulnerabili a interruzioni dovute a crisi sanitarie, geopolitiche o logistiche. Il reshoring intelligente si basa su fabbriche intelligenti (le “*smart factories*”) che integrano l’Internet of Things (IoT), il machine learning e l’IA per coordinare in modo efficiente i processi produttivi e logistici, adattandosi rapidamente alle variazioni della domanda e alle condizioni di mercato, grazie a processi modulabili.

3.3. Valorizzare la sostenibilità come leva economica

La sostenibilità ambientale è diventata un imperativo strategico per le imprese industriali, non solo per rispondere alle crescenti normative e alle aspettative di mercato, ma anche per cogliere nuove opportunità economiche e competitive (Li e Huang 2023; Kumar et al. 2019; Camilleri 2017; Sartal et al. 2014).

Le tecnologie intelligenti si configurano come strumenti fondamentali per accelerare la transizione verso modelli produttivi più sostenibili, efficienti e circolari. Permettendo di analizzare grandi quantità di dati in tempo reale a supporto di decisioni predittive e adattative, l’IA favorisce l’efficienza, riducendo l’impiego di risorse, ridimensionando gli sprechi e minimizzando l’impatto ambientale, generando al contempo valore economico.

Le sue applicazioni, infatti, consentono di coniugare innovazione tecnologica e responsabilità ambientale, intervenendo su diversi fronti che vanno dall’efficienza energetica alla gestione intelligente delle risorse, dal monitoraggio delle emissioni alla promozione di modelli produttivi circolari. Si analizzano di seguito gli ambiti che nei quali l’IA esprime le migliori potenzialità.

Il primo riguarda la riduzione dei consumi energetici e l’ottimizzazione delle risorse. L’IA permette di monitorare e gestire in modo intelligente i consumi energetici degli impianti produttivi, identificando inefficienze e suggerendo interventi mirati per ridurre gli sprechi (Waltersmann et al. 2021; Jamwal et al. 2021). Attraverso algoritmi di machine learning, è possibile prevedere i picchi di domanda e ottimizzare l’utilizzo delle



macchine, bilanciando la produzione con la disponibilità energetica e le condizioni operative. Questo approccio non solo abbassa i costi operativi, ma contribuisce a ridurre l'impronta ecologica dell'azienda, favorendo un uso più responsabile e sostenibile delle risorse naturali (Rasheed et al. 2024; Ojadi et al. 2023; Shumskaia 2022).

Il secondo ambito di impiego riguarda il monitoraggio delle emissioni tramite l'integrazione di sensori IoT con sistemi di AI. Ciò si traduce nella possibilità di avere un monitoraggio continuo e in tempo reale delle emissioni di gas serra e di altre sostanze inquinanti lungo l'intero ciclo produttivo. I dati raccolti vengono analizzati con tecniche di machine learning per individuare pattern, anomalie e possibili fonti di inefficienza ambientale consentendo interventi tempestivi per correggere processi non conformi, migliorare le performance ambientali e garantire il rispetto delle normative vigenti. Inoltre, la trasparenza e la tracciabilità offerte da questi sistemi facilitano la trasparenza della rendicontazione ambientale e la comunicazione con stakeholder e clienti sensibili alle tematiche green.

L'ultimo ambito si riferisce alla cosiddetta economia circolare tramite manutenzione predittiva e riciclo intelligente. La manutenzione predittiva utilizza dati provenienti da sensori e modelli di IA per anticipare guasti e malfunzionamenti degli impianti, riducendo fermi macchina e prolungando la vita utile degli asset (Dalzochio et al. 2020; Zonta et al. 2020). Questo approccio diminuisce la necessità di sostituzioni premature e di risorse aggiuntive, con evidenti benefici economici e ambientali.

Il riciclo intelligente (Ronaghi 2023) viene reso possibile dall'IA in due momenti distinti: in prima battuta efficientando le linee di produzione per ridurre al minimo la produzione di scarti e, successivamente, ottimizzandone la selezione, il trattamento ed il loro riutilizzo. Algoritmi avanzati possono identificare la composizione e la qualità dei rifiuti industriali, migliorando i processi di recupero e favorendo la riduzione dei rifiuti destinati alla discarica.



L'IA può rappresentare non solo un potenziale acceleratore della produttività, ma anche un catalizzatore della transizione ecologica. Le aziende che investono in queste tecnologie hanno l'opportunità di ridurre i costi operativi e, in molti casi, di accedere a incentivi e mercati emergenti orientati alla sostenibilità.

Sebbene, come si è visto, l'IA offra notevoli vantaggi dal punto di vista dell'utilizzo e dell'efficienza energetica, è tuttavia doveroso fare cenno anche al suo significativo impatto ambientale diretto. L'espansione dell'IA, in particolare quella generativa, infatti, sta determinando un rapido aumento del consumo di elettricità, prevalentemente nei data center, con conseguente incremento dell'impronta carbonica globale (Bashir et al. 2024). Tale domanda energetica, che si prevede raddoppierà entro il 2030, rischia di compromettere gli obiettivi di riduzione delle emissioni.

La crescita dell'IA comporta anche una maggiore deplezione di risorse naturali per la produzione di hardware e infrastrutture, e un elevato consumo idrico per il raffreddamento dei data center (Wang, Li e Li 2024; Zhuk 2023). Inoltre, i pur auspicabili miglioramenti nell'efficienza dell'IA sono spesso mitigati da effetti di rimbalzo, che incentivano un'adozione e un consumo complessivi maggiori, annullando i benefici iniziali.

L'integrazione della sostenibilità come leva economica efficace richiede, pertanto, una gestione proattiva e regolamentata di questi oneri ambientali diretti, bilanciando le esigenze di innovazione e progresso con quelle di preservazione e rigenerazione dell'ambiente tramite un uso etico e responsabile delle risorse.

4. Una nuova governance industriale

Il presente capitolo si propone di esplorare le dinamiche emergenti nella governance dell'industria nell'era dell'IA, affrontando le implicazioni e le sfide connesse a un contesto produttivo in rapida evoluzione.

L'adozione delle tecnologie intelligenti nei processi industriali non solo ridefinisce



modelli di business e modalità operative, ma richiede anche un ripensamento delle strutture regolative e organizzative per garantire un'implementazione responsabile, equa e sicura.

Nel corso dei paragrafi successivi verranno approfonditi temi fondamentali tra cui: le strategie di regolazione per mitigare le asimmetrie di potere tra le grandi imprese e le PMI, ma anche per proteggere i dati e il know-how aziendale; l'innovativo paradigma della sandbox normativa quale strumento per bilanciare le esigenze di innovazione con quelle di protezione di diritti fondamentali, libertà personali e beni comuni; il ruolo cruciale della collaborazione tra pubblico, privato e ricerca nella creazione di infrastrutture IA nazionali, accessibili e condivise; l'impatto dell'IA sui modelli organizzativi aziendali, con particolare attenzione alle nuove forme di collaborazione uomo-macchina e alla ridefinizione delle competenze e dei processi decisionali.

Questa analisi si configura come un contributo essenziale per delineare una governance industriale capace di sostenere lo sviluppo tecnologico e la competitività, in un quadro di inclusività e sostenibilità.

4.1. Regolare l'impiego dell'intelligenza artificiale in ambito industriale

L'IA sta rapidamente trasformando i processi produttivi e i modelli di business nell'industria avanzata, aprendo nuove opportunità ma anche sfide complesse in termini di governance, equità e sicurezza. La regolazione dovrebbe garantire che questa tecnologia venga adottata in modo responsabile, sostenibile e inclusivo, evitando rischi di concentrazione del potere economico e proteggendo il patrimonio intellettuale delle imprese, in particolare delle piccole e medie imprese (PMI).



Gli aspetti critici per una governance efficace dell'IA industriale sono principalmente il rischio di asimmetrie di potere (Muminova et al. 2024) e la protezione dei dati industriali e difesa del know-how aziendale.

Relativamente al primo aspetto critico, un quadro di regole chiaro e condiviso è fondamentale per evitare che l'adozione dell'IA accentui le disuguaglianze tra grandi imprese, che dispongono di risorse finanziarie e competenze per investire massicciamente in tecnologie avanzate, e PMI, che possono trovarsi escluse da questa trasformazione.

In uno scenario privo di regole adeguate le grandi aziende potrebbero consolidare posizioni di monopolio o oligopolio, controllando dati, algoritmi e infrastrutture digitali, con conseguenze negative per la competitività e la diversità del sistema produttivo nazionale. Una governance efficace dovrebbe quindi prevedere misure di supporto e inclusione per le PMI, favorendo l'accesso equo a infrastrutture, dati e competenze, e promuovendo modelli collaborativi e aperti di innovazione (Wynarczyk, Piperopoulos, e McAdam 2013).

Per quanto riguarda il secondo aspetto critico, va ricordato che i dati rappresentano il cuore pulsante dell'IA industriale e costituiscono un asset strategico fondamentale per le imprese. La protezione dei dati industriali è quindi essenziale per salvaguardare il know-how, la proprietà intellettuale e la competitività delle imprese, evitando fughe di informazioni sensibili o utilizzi impropri (Gupta et al. 2022; Corallo, Lazoi e Lezzi 2020). Ciò richiede l'adozione di standard elevati di sicurezza informatica, una consapevole gestione dei rischi, politiche chiare di gestione e condivisione dei dati, e un quadro normativo che bilanci apertura e tutela. Solo garantendo un ambiente di fiducia e sicurezza sarà possibile incentivare la collaborazione tra imprese e la creazione di ecosistemi digitali virtuosi, nei quali l'IA possa esprimere tutto il suo potenziale senza compromettere gli interessi delle singole realtà produttive.



4.2. Verso una sandbox normativa

L'IA rappresenta una frontiera tecnologica in rapida evoluzione, che richiede un equilibrio delicato tra promozione dell'innovazione e tutela di diritti, sicurezza e normative. Regolare le nuove tecnologie con normative rigide e complesse rischia di rallentare il processo di innovazione e potrebbe maggiormente penalizzare le PMI e le startup, che potrebbero non disporre dei mezzi per affrontare immediatamente tutti gli adempimenti normativi (Finocchiaro 2024).

Si pone quindi il problema di come testare sistemi di IA industriali senza ostacolare l'innovazione. Per bilanciare le esigenze di regolazione e innovazione, l'Ue ha proposto una sandbox normativa: spazi di sperimentazione regolamentata in cui le imprese, in particolare PMI e startup, possono testare prodotti e servizi basati su IA in un ambiente reale ma controllato, sotto la supervisione delle autorità competenti. Questo consente di valutare l'efficacia, i rischi e le implicazioni etiche delle tecnologie prima della loro diffusione su larga scala, senza il timore di incorrere immediatamente in sanzioni in caso di non conformità temporanea.

Durante la sperimentazione, le autorità competenti monitorano i progetti, fornendo indicazioni e supporto per mitigare i rischi relativi a diritti fondamentali, sicurezza e salute. Se i rischi risultano gestibili, l'azienda può proseguire lo sviluppo; in caso contrario, la sandbox può essere sospesa per tutelare l'interesse pubblico.

Questo approccio può favorire un dialogo collaborativo tra regolatori e imprese, stimola l'innovazione responsabile e accelera l'introduzione sul mercato di soluzioni di IA sicure, efficaci e conformi.

Un elemento chiave per garantire la fiducia nell'adozione dell'IA è la definizione di un modello di certificazione specifico per le soluzioni di IA industriali¹⁴ (Benraouane

¹⁴ La certificazione ISO/IEC 42001 è uno standard internazionale che specifica i requisiti per "stabilire, implementare, mantenere e migliorare continuamente un sistema di gestione dell'intelligenza artificiale all'interno delle organizzazioni" predisposto dall'Organizzazione internazionale per la standardizzazione (ISO) e dalla Commissione Elettrotecnica Internazionale (IEC).



2024). Tale certificazione attesta la conformità dei sistemi ai requisiti normativi, etici e di sicurezza previsti dall'AI Act e dalle altre normative europee e nazionali. Essa fornisce alle imprese uno strumento per dimostrare la qualità, l'affidabilità e la responsabilità delle proprie applicazioni IA, facilitando l'accesso ai mercati e la collaborazione con partner pubblici e privati.

La certificazione, inoltre, può essere integrata con i processi di sperimentazione nelle sandbox normative, creando così un percorso graduale per accompagnare le aziende dall'ideazione alla piena conformità, riducendo rischi e incertezze.

4.3. La collaborazione fra pubblico, privato e mondo della ricerca

In questo paragrafo si spiega il motivo per cui si ritiene sia necessaria una rete nazionale di infrastrutture IA accessibile a PMI e filiere produttive.

L'IA richiede infrastrutture digitali avanzate, sicure e ad alta capacità per poter essere sviluppata e applicata efficacemente su scala industriale (Van Der Vlist, Helmond e Ferrari 2024; Su et al. 2021). Queste infrastrutture includono reti di comunicazione ad alta velocità, data center, piattaforme cloud e sistemi di calcolo distribuito che, per garantire un'adozione diffusa e inclusiva dell'IA, devono essere accessibili non solo alle grandi aziende ma anche alle piccole e medie imprese (PMI), che costituiscono la spina dorsale del sistema produttivo italiano, e alle filiere produttive.

A livello globale, la competizione sull'IA è fortemente influenzata dagli investimenti in infrastrutture e ricerca. L'Europa, e in particolare l'Italia, investe significativamente meno rispetto agli Stati Uniti, dove gli stanziamenti per lo sviluppo dell'IA sono decisamente superiori. Tale divario rischia di tradursi in una perdita di competitività, con il rischio che l'Europa diventi un mercato di consumo di tecnologie sviluppate altrove, senza riuscire a catturare il valore generato dall'innovazione.



Con l'AI Continent Action Plan e un investimento di €200 Miliardi, l'Ue sta promuovendo la realizzazione di infrastrutture computazionali: attualmente 13 AI Factories già operative e 9 supercomputer ottimizzati per l'IA entro il 2026 con l'obiettivo di triplicare la capacità dei datacenter entro i prossimi 5-7 anni (Lusardi 2025; Ponti 2025).

Anche in Italia, la creazione di una rete nazionale di infrastrutture di IA deve rappresentare una priorità strategica per colmare il divario tecnologico e competitivo rispetto ai principali paesi leader nel settore¹⁵. Questa rete deve essere progettata come un sistema pubblico-privato integrato, capace di mettere a disposizione risorse, dati e servizi digitali in modo efficiente, sicuro e scalabile, favorendo la collaborazione tra imprese, centri di ricerca e istituzioni e permettendo alle imprese di sperimentare, sviluppare e scalare soluzioni basate sull'IA. Non dimentichiamo tuttavia la necessità di affiancare all'infrastruttura anche servizi di supporto tecnico, formazione e assistenza che sono indispensabili per diffondere la cultura dell'innovazione e facilitare l'adozione e l'integrazione dell'IA nei processi produttivi¹⁶.

L'impegno coordinato tra settore pubblico e privato deve portare alla creazione di una rete nazionale di infrastrutture che sia inclusiva, aperta e orientata alla crescita sostenibile del sistema industriale italiano.

¹⁵ AGID, Dipartimento per la trasformazione Digitale. Strategia italiana per l'Intelligenza Artificiale 2024-2026: <https://shorturl.at/vPwJ8>; AGID, Dipartimento per la trasformazione Digitale. Piano Nazionale Innovazione 2025: <https://docs.italia.it/italia/mid/>.

¹⁶ Il Regolamento (UE) 2024/1689 (c.d. AI Act) si riferisce ai servizi di supporto tecnico, formazione e assistenza come elementi indispensabili per diffondere la cultura dell'innovazione. In particolare, l'articolo 4 introduce l'obbligo di adottare misure per garantire un livello adeguato di alfabetizzazione del personale in materia di IA e di tutte le persone coinvolte nell'utilizzo dei sistemi di IA. È inclusa la formazione per sviluppare competenze, conoscenze e comprensione necessarie a usare l'IA in modo trasparente e sicuro, oltre a promuovere la supervisione umana e la gestione del rischio. Le misure formative e di supporto mirano a ridurre i rischi e facilitare un uso responsabile, etico e competente dell'intelligenza artificiale nelle organizzazioni. La normativa sottolinea anche l'importanza di pianificare questi interventi tenendo conto delle diverse competenze tecniche, esperienze e ruoli, favorendo così una diffusione ampia e inclusiva della cultura digitale e di innovazione basata sull'IA.



4.4. Nuovi modelli organizzativi

L'introduzione dell'IA, e in particolare di quella generativa, nei processi aziendali sta contribuendo ad una profonda trasformazione dei modelli organizzativi tradizionali proponendo nuovi terreni di collaborazione uomo-macchina. Sono gli ambiti dove la creatività, l'ingegneria, la progettazione e la condivisione di informazioni tra personale esperto e meno esperto ha, da sempre, costituito il cuore di ogni impresa coltivando nello stesso luogo, e nello stesso spazio fisico, la crescita e diffusione del know-how e della cultura aziendale che sono le basi per consentire un adeguato passaggio generazionale e la gestione ottimale dell'azienda stessa.

Ora le aziende possono e devono considerare a tutti gli effetti, come parte del personale anche l'IA che ha dimostrato di essere versatile, ovvero in grado di ricoprire ruoli e professioni diverse, e capace di interconnettersi con la realtà in cui è inserita interagendo con macchine, dispositivi e, soprattutto, persone.

Dell'Acqua e colleghi (2025) hanno analizzato quella che notoriamente è una casistica che si riscontra nella maggior parte delle realtà produttive: la distinzione tra specialisti di Ricerca e Sviluppo, che hanno un orientamento tecnico, e gli specialisti commerciali più portati a soluzioni e idee indirizzate al mercato. Il lavoro separato di queste due anime porta normalmente a risultati inefficaci mentre la collaborazione tra R e D e Commerciali consente di trovare soluzioni più equilibrate. Nei casi in cui è stata affiancata l'IA, in modo separato agli specialisti R e D e agli specialisti Commerciali, si è osservato un miglioramento tale da poter affermare che i risultati finali prodotti separatamente dalle due professionalità, sono paragonabili, in termini di bilanciamento ed equilibrio, a quelli che si sarebbero ottenuti facendo collaborare R e D e Commerciali. Il risultato migliora se si affianca l'IA al lavoro congiunto del team R e D e Commerciali. Lo studio ha anche dimostrato che l'IA ha permesso la trasmissione di competenze di tipo diverso, in particolare tra risorse più esperte verso risorse meno esperte, colmando i divari funzionali e permettendo ai meno esperti di comportarsi da specialisti.



Dal punto di vista dell'organizzazione aziendale (es. leadership, team management, change management, cultura aziendale, valutazione delle performance, politiche salariali e di incentivazione) questo risultato apre nuove prospettive con le quali è necessario confrontarsi per disegnare nuovi modelli organizzativi e di gestione del lavoro. Inoltre, con l'aiuto dell'IA, si possono esplorare nuovi domini tematici, prima appannaggio di esperti, che portano a definire nuovi segmenti di clientela, che prima non erano redditizi portando, in ultima analisi, alla creazione di nuovi modelli di business.

5. Rischi, innovazione e impresa

L'adozione dell'intelligenza artificiale comporta una serie di rischi eterogenei e non trascurabili — di natura etica, sociale, economica, normativa e ambientale — che richiedono un'attenta valutazione e una gestione sistematica all'interno delle strategie aziendali di innovazione.

È opportuno sottolineare che ogni processo di innovazione implica, per sua natura, una componente di rischio. Si tratta quindi di analizzare e valutare attentamente le condizioni di contesto che possono comportare rischi, definire misure di prevenzione, contenimento o eliminazione e dare seguito ad un monitoraggio puntuale nel tempo.

In pratica il rischio deve essere gestito pur nella piena consapevolezza che l'utilizzo di IA comporta un elevato livello di complessità e incertezza. Infatti, la maggiore difficoltà che si incontra nell'adozione dell'intelligenza artificiale (soprattutto IA generativa), è il doversi confrontare con una tecnologia in continua e rapida evoluzione che porta implicitamente con sé rischi potenziali che, allo stato attuale, non sempre è possibile ipotizzare o prevedere.

Considerando l'ampia gamma di rischi connessi all'adozione dell'intelligenza artificiale e l'elevata complessità nel loro monitoraggio, emerge la necessità di un quadro normativo che codifichi un approccio strutturato e sistematico alla gestione di tali rischi. In questo



contesto, l'AI Act¹⁷ rappresenta una risposta normativa innovativa che adotta un metodo basato sul rischio (risk-based approach), classificando i sistemi di IA in funzione del potenziale impatto e prevedendo misure proporzionate al livello di rischio. Questa classificazione spazia dai sistemi vietati per rischi inaccettabili, a quelli ad alto rischio soggetti a stringenti requisiti di trasparenza, controllo umano e valutazioni di conformità, fino ai sistemi a basso rischio con limitate imposizioni regolatorie. Tale approccio permette di coniugare innovazione e tutela, gestendo dinamicamente le sfide etiche e operative di tecnologie in continua evoluzione e assicurando un monitoraggio e una valutazione rigorosi lungo l'intero ciclo di vita dei sistemi IA, coerentemente con la necessità di governance responsabile delineata.

Questo quadro normativo fornisce dunque un valido riferimento per orientare le strategie di gestione del rischio (Baryannis et al. 2019; Tupa et al. 2017; Klinke e Renn 2002), integrando le responsabilità quotidiane d'impresa con gli obblighi e le opportunità derivanti dalla regolamentazione europea.

Il ruolo di imprenditori e manager diventa quindi centrale, poiché la gestione del rischio, pur non essendo una novità, è da sempre una delle responsabilità fondamentali a cui sono chiamati.

Per sfruttare l'innovazione come leva strategica per continuare a rimanere sul mercato, recuperare competitività e rilanciare l'industria italiana - soprattutto le PMI che costituiscono il 90% del tessuto produttivo del Paese - occorre che i rischi vengano affrontati e gestiti partendo da chi ha nelle proprie prerogative la guida delle imprese. Non si tratta di una responsabilità a senso unico ma deve essere inquadrata all'interno di un piano sistema-paese dotato di strumenti strutturali, normativi e di supporto che mettano l'imprenditore nelle condizioni di poter prendere le giuste e opportune decisioni.

¹⁷ Regolamento (UE) 2024/1689 del 13 giugno 2024, che stabilisce regole armonizzate sull'intelligenza artificiale: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1689>.



Di fronte a trasformazioni radicali, come quelle in corso, l'unica cosa che non possiamo fare è rimanere fermi. In questo senso l'open innovation, la collaborazione pubblico-privato-comunità scientifica diventa un elemento fondamentale.

6. Sette direttrici strategiche per l'innovazione e l'adozione dell'IA

La trasformazione digitale del sistema produttivo richiede un approccio strategico che sia al tempo stesso sistemico, multilivello e orientato all'impatto. In quest'ottica, la Commissione per la Promozione dell'Industria Avanzata di ENIA ha delineato sette direttrici prioritarie per supportare il sistema industriale nella trasformazione intelligente. Le direttrici individuate rispondono alla necessità di creare le condizioni abilitanti per una diffusione efficace e consapevole dell'IA, affrontando in modo integrato sia gli aspetti tecnologici e infrastrutturali, sia quelli normativi, culturali e organizzativi.

Il percorso strategico si apre con l'attenzione alla costruzione di ecosistemi di dati industriali, punto di partenza per abilitare l'innovazione digitale in modo collaborativo e sicuro. A questo si affianca il tema dell'accompagnamento alle imprese, fondamentale per rendere l'adozione dell'IA concretamente accessibile, in particolare per il tessuto produttivo delle piccole e medie imprese. Segue la direttrice dedicata alla formazione e all'alfabetizzazione, che riconosce nel capitale umano un fattore abilitante imprescindibile, affiancato dall'esigenza di strumenti di monitoraggio e trasparenza, per osservare in modo sistematico l'evoluzione dell'adozione dell'IA sul territorio. Per favorire la sperimentazione in ambiti complessi, viene proposta l'attivazione di sandbox normative, pensate per bilanciare innovazione e compliance. A livello relazionale, i partenariati territoriali e le collaborazioni internazionali rappresentano un vettore strategico per lo sviluppo e la diffusione di pratiche condivise e soluzioni avanzate.



Infine, la disponibilità di infrastrutture digitali condivise viene indicata come condizione essenziale per garantire un accesso equo alle tecnologie da parte di tutti gli attori del sistema industriale.

L'articolazione di queste sette direttrici definisce un impianto coerente e integrato, volto a sostenere la trasformazione intelligente dell'industria italiana in linea con i principi di apertura, inclusività e sostenibilità.

6.1. Ecosistemi di dati industriali

Una delle condizioni abilitanti fondamentali per la trasformazione intelligente del sistema produttivo è la disponibilità di dati condivisi, accessibili e interoperabili. In tale direzione, si intende promuovere e partecipare attivamente alla progettazione di piattaforme, standard e consorzi che facilitino la condivisione dei dati in modo sicuro, competitivo e conforme alle normative vigenti. Un'attenzione particolare va rivolta alla realizzazione di infrastrutture digitali settoriali in cui le imprese, operanti all'interno di uno stesso comparto industriale, possano caricare, condividere e valorizzare informazioni di natura produttiva, logistica o energetica. Questi ambienti devono garantire il rispetto delle normative in materia di privacy e concorrenza, costituendo uno spazio fidato per la cooperazione tra attori economici.

In parallelo, è essenziale promuovere l'adozione di standard comuni di interoperabilità, attraverso la definizione di linee guida e specifiche tecniche che permettano l'integrazione tra sistemi industriali eterogenei. Ciò consente la costruzione di ecosistemi digitali aperti, modulari e scalabili, che favoriscano la circolazione dei dati tra organizzazioni diverse.

Infine, un ulteriore asse strategico consiste nella valorizzazione dei dati industriali mediante modelli consortili che coinvolgano imprese, università e centri di ricerca. La gestione condivisa dei dati all'interno di queste alleanze consente la creazione di basi dati comuni, fondamentali per l'addestramento di modelli di IA per l'industria.



6.2. Accompagnamento alle imprese

Per favorire una diffusione capillare dell'IA nel tessuto produttivo nazionale, è necessario rendere l'adozione delle tecnologie IA semplice, accessibile e scalabile, in particolare per le piccole e medie imprese. In quest'ottica, è strategico sostenere iniziative che facilitino il percorso di integrazione dell'IA nei processi aziendali, fornendo strumenti concreti di orientamento e supporto operativo.

Un primo strumento chiave è rappresentato dagli sportelli tecnici, concepiti come punti di riferimento locali in grado di offrire consulenza specialistica, attività di orientamento e servizi di matchmaking tecnologico. Tali sportelli possono fungere da ponte tra le esigenze delle imprese e le soluzioni tecnologiche disponibili, riducendo le barriere informative e operative che ostacolano l'innovazione.

Accanto a questo presidio territoriale, è fondamentale sviluppare un catalogo nazionale di use case, costituito da una raccolta pubblica, strutturata e consultabile di casi d'uso replicabili, validati e documentati. Questa iniziativa permette di diffondere esempi concreti di implementazione dell'IA nei diversi settori produttivi, facilitando il trasferimento di conoscenze e la replicabilità delle soluzioni già sperimentate con successo.

6.3. Formazione e alfabetizzazione

Lo sviluppo e l'adozione efficace dell'IA richiedono un investimento sistematico nel capitale umano. Senza competenze diffuse e aggiornate, infatti, l'innovazione rischia di rimanere confinata a poche realtà pionieristiche. È quindi fondamentale promuovere iniziative di formazione rivolte sia al personale tecnico sia ai profili manageriali, con l'obiettivo di accrescere la capacità delle imprese di comprendere, valutare e integrare soluzioni basate su IA. In questa prospettiva, assumono un ruolo centrale i corsi



executive e tecnici finalizzati a rafforzare le competenze strategiche e operative nell'utilizzo dell'IA. Tali percorsi devono essere calibrati sulle esigenze delle imprese, prevedendo formati formativi flessibili e mirati, adatti sia ai decision maker che agli operatori coinvolti nei processi produttivi e organizzativi.

Un ulteriore strumento strategico è rappresentato dalle Academy IA per le PMI, da intendersi come strutture di formazione permanente radicate a livello regionale, realizzate in sinergia con i competence center e gli attori territoriali dell'innovazione. Questi presidi formativi hanno il compito di accompagnare le piccole imprese in un percorso progressivo di alfabetizzazione, sperimentazione e adozione consapevole delle tecnologie IA.

All'interno dei distretti industriali tradizionali, è inoltre necessario attivare programmi di reskilling per sostenere la riconversione dei lavoratori impiegati in settori a rischio di obsolescenza tecnologica, garantendo così una transizione inclusiva e socialmente sostenibile.

A completamento del quadro formativo, rivestono un ruolo importante le campagne informative rivolte non solo alle imprese, ma anche al pubblico più ampio. La creazione e la diffusione di contenuti divulgativi e formativi, anche attraverso eventi locali, testimonianze operative e iniziative in collaborazione con le realtà produttive, consentono di ampliare la consapevolezza collettiva rispetto alle opportunità e alle sfide poste dall'IA.

6.4. Monitoraggio e trasparenza

La promozione di un'adozione diffusa e responsabile dell'IA nel sistema produttivo nazionale passa anche attraverso meccanismi efficaci di monitoraggio, rendicontazione e trasparenza. In quest'ottica, è necessario supportare la creazione di strumenti e osservatori pubblici in grado di tracciare in modo continuativo l'evoluzione dei progetti IA in Italia, offrendo una lettura articolata e accessibile del fenomeno a livello



territoriale e settoriale.

Una prima azione strategica riguarda la realizzazione di un report periodico sull'adozione dell'IA nell'industria italiana, che analizzi l'utilizzo delle tecnologie nei diversi comparti produttivi, distinguendo per dimensione aziendale e collocazione geografica. Questo tipo di analisi consente non solo di fotografare lo stato dell'arte, ma anche di individuare aree di eccellenza e criticità su cui intervenire con misure mirate.

Complementare a tale attività è lo sviluppo di una dashboard pubblica interattiva, concepita come una piattaforma digitale ad accesso aperto che raccolga e visualizzi dati, geolocalizzazioni, statistiche, benchmark e indicatori rilevanti. Uno strumento di questo tipo rende disponibili informazioni aggiornate e trasparenti, facilitando il confronto tra territori, settori e iniziative, e promuovendo al tempo stesso una governance basata sull'evidenza.

6.5. Sandbox normative

Per favorire lo sviluppo e l'adozione di soluzioni basate su IA anche in contesti complessi e fortemente regolati, è necessario predisporre ambienti controllati e flessibili in cui sperimentare nuove tecnologie senza inibire l'innovazione. In questa direzione, assume particolare rilievo la creazione di sandbox normative, intese come spazi di sperimentazione regolata in cui testare applicazioni avanzate in condizioni protette e con margini di deroga temporanea rispetto alla normativa vigente.

Questi spazi possono assumere la forma di aree industriali o distretti selezionati, dove le imprese hanno la possibilità di sperimentare soluzioni IA ad alto contenuto innovativo, beneficiando di un contesto giuridico flessibile ma comunque presidiato. A supporto di tali sperimentazioni, è utile introdurre protocolli di certificazione dedicati, caratterizzati da iter snelli e specifici, volti a validare la sicurezza, l'etica e la trasparenza delle soluzioni adottate.



Particolare attenzione deve essere riservata ai settori regolati, come la sanità, l'energia o i trasporti, in cui l'adozione dell'IA può generare benefici significativi ma richiede una stretta collaborazione con le autorità di vigilanza. In questi ambiti, l'obiettivo è garantire che l'introduzione di tecnologie avanzate avvenga nel rispetto dei principi di conformità normativa, salvaguardando al contempo la possibilità di innovare.

6.6. Partenariati territoriali e collaborazioni internazionali

L'adozione efficace dell'IA richiede una rete solida di alleanze strategiche, sia a livello nazionale che internazionale. In quest'ottica, è fondamentale promuovere partenariati territoriali tra Regioni, università, distretti industriali ed enti di ricerca, con l'obiettivo di integrare le politiche locali di innovazione, formazione, ricerca applicata e sviluppo delle competenze in una visione condivisa. Parallelamente, è necessario rafforzare il legame con l'ecosistema europeo dell'innovazione, attraverso la partecipazione attiva a bandi comunitari, reti tematiche e progetti cofinanziati, così da valorizzare le sinergie e le opportunità offerte dallo spazio europeo della ricerca e della tecnologia.

Un ulteriore ambito d'azione riguarda lo scambio internazionale di buone pratiche, reso possibile dalla promozione di missioni di studio, attività di benchmarking e protocolli di intesa con Paesi ad alto tasso di innovazione, favorendo il confronto e la circolazione di modelli replicabili.

La dimensione internazionale si esprime anche attraverso progetti bilaterali di trasferimento tecnologico, che prevedano il co-sviluppo di soluzioni IA tra attori pubblici e privati a livello transnazionale.

Infine, la definizione e la sottoscrizione condivisa di una "Carta dell'industria AI-driven" può rappresentare un importante strumento di orientamento strategico, capace di raccogliere l'adesione degli stakeholder intorno a principi comuni di innovazione responsabile, sostenibilità e buona governance.



6.7. Infrastrutture digitali condivise

Per garantire una diffusione equa e capillare dell'IA all'interno del tessuto produttivo nazionale, è essenziale promuovere l'accesso alle infrastrutture digitali da parte di tutte le imprese, comprese le PMI, che spesso non dispongono autonomamente delle risorse necessarie per sostenere investimenti in tecnologie avanzate. In quest'ottica, risulta prioritario il potenziamento dei nodi di calcolo esistenti, attraverso investimenti mirati in ambiti strategici quali il supercalcolo, il cloud sovrano e le capacità di storage, prevedendo modalità di accesso semplificate e dedicate anche per le imprese di piccole dimensioni. Accanto a queste infrastrutture centrali, si propone lo sviluppo di IA Lab Territoriali, ovvero laboratori fisici o virtuali dislocati a livello locale, dotati di strumenti per la sperimentazione, la mentorship e il testing, così da accompagnare concretamente le PMI nei percorsi di adozione tecnologica.

Un ulteriore elemento abilitante è rappresentato dall'accesso facilitato al cloud europeo, che consente alle imprese di transitare verso ambienti digitali sicuri, conformi e interoperabili, beneficiando di soluzioni certificate a livello continentale.

7. Conclusioni: l'IA come acceleratore industriale ed economico

L'IA, pur richiedendo un'attenta valutazione dei rischi etici, normativi e sociali, si configura oggi come una leva strategica cruciale per colmare il divario che separa l'industria italiana dai principali concorrenti internazionali. La sua capacità di trasformare profondamente i processi produttivi, ottimizzare l'allocazione delle risorse e abilitare nuovi modelli di business la rende un acceleratore trasversale della modernizzazione industriale e dello sviluppo economico.

Questa trasformazione può generare impatti significativi su tre assi prioritari.



Il primo riguarda la modernizzazione industriale e organizzativa, grazie all'introduzione di tecnologie intelligenti nelle fabbriche, le cosiddette smart factory, e all'automazione avanzata degli impianti, che consentono di migliorare in modo sostanziale l'efficienza, la flessibilità e la capacità adattiva dei processi produttivi.

Il secondo fronte è rappresentato dalla competitività globale e dal fenomeno del reshoring, reso possibile dall'ottimizzazione delle filiere produttive e delle supply chain. L'adozione di soluzioni IA consente infatti una maggiore resilienza e indipendenza da fattori macroeconomici esterni, creando le condizioni per rendere nuovamente conveniente localizzare la produzione in Italia.

Infine, l'IA offre un contributo determinante alla circular economy, facilitando la gestione intelligente delle risorse, il monitoraggio ambientale e l'implementazione di pratiche di manutenzione predittiva. Questi interventi permettono di ridurre sprechi, minimizzare gli impatti ambientali e prolungare il ciclo di vita dei prodotti, in linea con i principi della sostenibilità e dell'efficienza.

La Commissione per la Promozione dell'Industria Avanzata ritiene di avere individuato almeno tre linee principali sulle quali agire.

In primo luogo, l'IA rappresenta una leva di competitività, ma per dispiegarne appieno il potenziale è necessario dotarsi di una strategia chiara, coerente e orientata all'impatto. L'adozione di tecnologie avanzate non può essere lasciata alla frammentazione di iniziative isolate, ma richiede una visione sistemica, capace di allineare investimenti, policy pubbliche e traiettorie di sviluppo industriale.

In secondo luogo, la trasformazione e l'innovazione tecnologica dell'industria avanzata devono essere guidate da principi etici. Questo significa garantire che l'integrazione dell'IA nei processi produttivi e decisionali avvenga nel rispetto dei diritti fondamentali, della trasparenza e della responsabilità, valorizzando un approccio umano-centrico e orientato al bene comune.

Infine, è indispensabile promuovere una stretta collaborazione tra imprese, istituzioni e mondo della ricerca. Solo attraverso alleanze solide e strutturate sarà possibile



costruire un ecosistema industriale IA e data-driven che sia realmente scalabile, etico e sostenibile. Tale cooperazione rappresenta la chiave per affrontare la complessità della transizione tecnologica e garantire che i benefici generati siano equamente distribuiti sul territorio.

Non occorre reinventare tutto ma mettere a terra, in modo coordinato e funzionale, ciò che già esiste per costruire un'industria italiana davvero IA-driven. L'adozione dell'IA non si esaurisce in un processo meramente tecnico, ma richiede una trasformazione culturale diffusa, che coinvolga la comunità civile, industriale, istituzionale e scientifica capace di costruire insieme questa trasformazione.

Michele Ferrero, imprenditore italiano che ha fatto la storia industriale di questo Paese e che ha saputo affrontare con coraggio, lungimiranza e consapevolezza i rischi legati all'innovazione cogliendone tutte le potenzialità, diceva: *«Rendete partecipi i collaboratori dei cambiamenti e discutetene prima della loro attuazione con gli interessati».*

Se si vuole davvero che l'IA sia uno strumento di innovazione per migliorare l'economia italiana e recuperare competitività delle imprese, occorre partire dai territori e dalle persone, dal confronto collettivo, dal coinvolgimento effettivo di tutti gli stakeholder e dalla condivisione della responsabilità.



Riferimenti bibliografici

1. Agenda Digitale (n.d.). Automazione industriale e riduzione delle emissioni. Agenda Digitale. <https://www.agendadigitale.eu/>.
2. Agenzia per la Promozione della Ricerca Europea (2025). AI Factories: i nuovi motori dell'Intelligenza Artificiale europea. <https://shorturl.at/Dnmjj>.
3. AGID, Dipartimento per la trasformazione Digitale (2025). Piano Nazionale Innovazione 2025. AGID, Dipartimento per la trasformazione Digitale. <https://shorturl.at/MiN9w>.
4. AGID, Dipartimento per la trasformazione Digitale (2025). Strategia italiana per l'Intelligenza Artificiale 2024-2026. AGID, Dipartimento per la trasformazione Digitale. <https://shorturl.at/SeZmG>.
5. Akkan, M. M. (2025). Reshoring Decisions in Supply Chains and Industry 5.0 Optimization: AI Based Sustainable Decision Support Model. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6252236/v1>.
6. Andreani P, Aversa M. L., Checcucci P, and Ladevaia V. (2025). Digitalizzazione, mercato del lavoro e organizzazioni. Alcune indicazioni di policy. INAPP PAPER n. 56.
7. Andreani P, Aversa M. L., Checcucci P, Ladevaia V, and Stoppo G. (2021). *Digitalizzazione, mercato del lavoro e organizzazioni; L'ecosistema italiano dell'intelligenza artificiale*. INAPP; Università Politecnica delle Marche.
8. Baryannis, G., Validi, S., Dani, S., and Antoniou, G. (2018). Supply chain risk management and artificial intelligence: state of the art and future research directions. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2179–2202. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1530476>
9. Bashir, N., Donti, P., Cuff, J., Sroka, S., Ilic, M., Sze, V., Delimitrou, C. and Olivetti E. (2024). The Climate and Sustainability Implications of Generative AI. MIT Exploration of Generative AI.
10. Benraouane, S. A. (2024). AI Management System Certification According to the ISO/IEC 42001 Standard: How to Audit, Certify, and Build Responsible AI Systems. Productivity Press. <https://doi.org/10.4324/9781003463979>.
11. Bettiol, M., Capestro, M., Di Maria, E., and Micelli, S. (2021). SMEs@ Industry 4.0: a comparison between top and average performers. *Sinergie Italian Journal of Management*, 39(3), 27-48. <https://doi.org/10.7433/s116.2021.03>.
12. Birkel, H., Müller, J.M. (2025). Resilient by nature or technology? How Industry 4.0 enhances Supply Chain Resilience until 2035. *Supply Chain Management: An International Journal*, 30(3), 304-322. <https://doi.org/10.1108/SCM-07-2023-0340>.
13. Boston Consulting Group (2024). The AI Maturity Matrix. Boston Consulting Group. <https://shorturl.at/7qbDd>.



14. Brogaard, L. (2019). Innovative outcomes in public-private innovation partnerships: a systematic review of empirical evidence and current challenges. *Public Management Review*, 23(1), 135–157. <https://doi.org/10.1080/14719037.2019.1668473>.
15. Cambridge dictionary (2025). Cambridge dictionary. <https://dictionary.cambridge.org>
16. Camilleri, M. A. (2017). Corporate sustainability and responsibility: creating value for business, society and the environment. *Asian Journal of Sustainability and Social Responsibility*, 2(1), 59-74. <https://doi.org/10.1186/s41180-017-0016-5>.
17. Celant, C., and Pustokhina, I. V. (2020). Future trends and Italian SMEs. *American Journal of Business and Operations Research*, 1(1), 52-59. <https://doi.org/10.54216/AJBOR.010105>.
18. CENSIS (2025). *Economia Artificiale. Esposizione del mondo del lavoro e delle imprese alla diffusione dell'IA*. <https://www.censis.it/economia/focus-censisconfcooperative>.
19. Commissione Europea (2021). *Manifesto per la Digital Decade 2030*. Unione Europea. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/it/policies/europes-digital-decade>.
20. Commissione Europea (2025). AI Continent Action Plan. European Parliament. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/it/library/ai-continent-action-plan>.
21. Commissione Europea (2025). AI Factories. European Parliament. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/ai-factories>.
22. Commissione Europea (2025). *DESI indicators*. Unione Europea. <https://digital-decade-desi.digital-strategy.ec.europa.eu/>.
23. Corallo, A., Lazoi, M., Lezzi, M. (2020). Cybersecurity in the context of industry 4.0: A structured classification of critical assets and business impacts. *Computers in Industry*, 114, 103165, ISSN 0166-3615. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103165>.
24. Cui, Y., Kara, S., and Chan, K.C. (2020). Manufacturing big data ecosystem: A systematic literature review. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 62, 101861. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101861>.
25. Dalzochio, J., Kunst, R., Pignaton, E., Binotto, A., Sanyal, S., Favilla, J., and Barbosa, J. (2020). Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4.0: Current status and challenges. *Computers in industry*, 123, 103298. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103298>
26. De-Graft, J. O., Perera, S., Osei-Kyei, R., Rashidi, M. (2021). Digital twin application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102726>.
27. Dell'Acqua, F., Ayoubi, C., Lifshitz, H., Sadun, R., Mollick, E., Mollick, L., Han, Y., Goldman, J., Nair, H., Taub, S. and Lakhani, K. R. (2025). The Cybernetic Teammate: A Field Experiment on Generative AI Reshaping Teamwork and Expertise. Harvard Business School Working Paper, No. 25-043. <https://doi.org/10.3386/w33641>.



28. European Parliament (2024). AI Factories. European Parliament. <https://shorturl.at/4gxRg>.
29. Fang, B., Yu, J., Chen, Z., Osman, A. I., Farghali, M., Ihara, I., Hamza, E. H., Rooney, D. W., Yap, P.-S. (2023). Artificial intelligence for waste management in smart cities: a review. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01604-3>.
30. Farmanesh, P., Solati Dehkordi, N., Vehbi, A., Chavali, K. (2025). Artificial Intelligence and Green Innovation in Small and Medium-Sized Enterprises and Competitive-Advantage Drive Toward Achieving Sustainable Development Goals. *Sustainability*, 17(5), 2162. <https://doi.org/10.3390/su17052162>.
31. Finocchiaro, G. (2024). The regulation of artificial intelligence. *AI and Society*, 39(4), 1961-1968. <https://doi.org/10.1007/s00146-023-01650-z>.
32. Ghoreishi, M., and Happonen, A. (2020). Key enablers for deploying artificial intelligence for circular economy embracing sustainable product design: Three case studies. In AIP conference proceedings, 2233(1), p. 050008. AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0001339>.
33. Grant, E. (2021). Big data-driven innovation, deep learning-assisted smart process planning, and product decision-making information systems in sustainable industry 4.0. *Economics, Management, and Financial Markets*, 16(1), 9–19. <https://doi.org/10.22381/emfm16120211>.
34. Gröger, C. (2021). There Is No AI Without Data Industry experiences on the data challenges of AI and the call for a data ecosystem for industrial enterprises. *Communications of the ACM*, 64(11), 98-108. <https://doi.org/10.1145/3448247>
35. Gupta, I., Singh, A. K., Lee, C.-N. and Buyya, R. (2022). Secure Data Storage and Sharing Techniques for Data Protection in Cloud Environments: A Systematic Review, Analysis, and Future Directions. *IEEE Access*, 10. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3188110>.
36. Hernandez, J. C. R., Villa-Enciso, E., Cardona-Acevedo, S., Valencia, J., Velasquez Salas, S. (2025). Smart Innovation for a Circular Economy: A Systematic Review of Emerging Trends and the Future of AI in the Sustainable Economy. *Sustainability*, 17(13), 5793. <https://doi.org/10.3390/su17135793>.
37. Iannino, V. et al. (2021). Improving the Flexibility of Production Scheduling in Flat Steel Production Through Standard and AI-Based Approaches: Challenges and Perspectives. *Springer, Cham*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79150-6_49.
38. ISTAT (2025). *Rilevazione sull'utilizzo dell'ICT nelle imprese*. ISTAT. <https://www.istat.it/wp-content/uploads/2025/01/Statreport ICT2024-1.pdf>
39. Jagatheesaperumal, S. K., Rahouti, M., Ahmad, K., Al-Fuqaha, A., and Guizani, M. (2021). The duo of artificial intelligence and big data for industry 4.0: Applications, techniques, challenges, and future research directions. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(15), 12861-12885. <https://doi.org/10.1109/IIOT.2021.3139827>.



40. Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M., and Giallanza, A. (2021). Industry 4.0 technologies for manufacturing sustainability: A systematic review and future research directions. *Applied Sciences*, 11(12), 5725. <https://doi.org/10.3390/app11125725>
41. Jan, Z., Ahamed, F., Mayer, W., Patel, N., Grossmann, G., Stumptner, M., and Kuusk, A (2023). Artificial intelligence for industry 4.0: Systematic review of applications, challenges, and opportunities. *Expert Systems with Applications*, 216, 119456. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119456>.
42. Johnson, M., Jain, R., Brennan-Tonetta, P., Swartz, E., Silver, D., Paolini, J., and Hill, C. (2021). Impact of big data and artificial intelligence on industry: developing a workforce roadmap for a data driven economy. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 22(3), 197-217. <https://doi.org/10.1007/s40171-021-00272-y>.
43. Klinke, A., Renn, O. (2002). A New Approach to Risk Evaluation and Management: Risk-Based, Precaution-Based, and Discourse-Based Strategies. *Society for Risk Analysis. Risk Analysis*, 22(6). <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00274>.
44. Kotsiopoulos, T., Sarigiannidis, P., Ioannidis, D., and Tzovaras, D. (2021). Machine learning and deep learning in smart manufacturing: The smart grid paradigm. *Computer Science Review*. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100341>.
45. Kumar, V., Sezersan, I., Garza-Reyes, J. A., Gonzalez, E.D.R.S., and AL-Shboul, M.A (2019). Circular economy in the manufacturing sector: benefits, opportunities and barriers. *Management Decision*, 57(4): 1067–1086. <https://doi.org/10.1108/MD-09-2018-1070>.
46. Li, C., Huang, M. (2023). Environmental Sustainability in the Age of Big Data: Opportunities and Challenges for Business and Industry. *Environ Sci Pollut Res*, 30, 119001–119015. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30301-5>.
47. Liu, C., Peng, G., Kong, Y., Li, S., and Chen, S. (2021). Data Quality Affecting Big Data Analytics in Smart Factories: Research Themes, Issues and Methods. *Symmetry*. <https://doi.org/10.3390/sym13081440>.
48. Lusardi, G. (2025). L'AI Continent Action Plan: la strategia della Commissione Europea per il futuro dell'intelligenza artificiale in Europa. *Diritto al digitale*. <https://dirittoaldigitale.com/2025/07/30/continent-action-plan/>.
49. Mao, H., Zhang, T., Tang, Q. (2021). Research Framework for Determining How Artificial Intelligence Enables Information Technology Service Management for Business Model Resilience. *Sustainability*, 13,11496. <https://doi.org/10.3390/su132011496>.
50. Mathew, D., Brintha, N. C., Jappes, J. T. W. (2023). Artificial intelligence powered automation for industry 4.0. In *New horizons for Industry 4.0 in modern business. Contributions to Environmental Sciences and Innovative Business Technology*. Springer, Charm. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20443-2_1.
51. McKinsey and Company (n.d.). Digitalizzazione e sostenibilità nel settore manifatturiero. McKinsey and Company. <https://www.mckinsey.com/>.



52. Muminova, E., Ashurov, M., Akhunova, S. and Turgunov, M. (2024). AI in Small and Medium Enterprises: Assessing the Barriers, Benefits, and Socioeconomic Impacts. *International Conference on Knowledge Engineering and Communication Systems*, Chikkaballapur, India. <https://doi.org/10.1109/ICKECS61492.2024.10616816>.
53. Nagorny, K., Lima-Monteiro, P., Barata, J., and Colombo, A.W. (2021). Big Data Analysis in Smart Manufacturing: A Review. *International Journal of Communications, Network and System Sciences*,10(3). <https://doi.org/10.4236/ijcns.2017.103003>.
54. OECD (2023). *Recommendation of the Council on Artificial Intelligence*. <https://www.oecd.org/en/topics/policy-issues/artificial-intelligence.html>.
55. Ojadi, J. O., Onukwulu, E., Odionu, C., and Owulade, O. (2023). AI-driven predictive analytics for carbon emission reduction in industrial manufacturing: a machine learning approach to sustainable production. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 4(1), 948-960. <https://doi.org/10.54660/IJMRGE.2023.4.1.948-960>.
56. Oladapo, B. I., Olawumi, M. A., and Omigbodun, F. T. (2024). AI-Driven Circular Economy of Enhancing Sustainability and Efficiency in Industrial Operations. *Sustainability*, 16(23), 10358. <https://doi.org/10.3390/su162310358>.
57. Pahune, S., Akhtar, Z., Mandapati, V., and Siddique, K. (2025). The Importance of AI Data Governance in Large Language Models. *Big Data and Cognitive Computing*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/bdcc9060147>.
58. Paoloni, P., Manzo, M., and Procacci, V. (2023). The impact of the pandemic crisis on the digital transition process of Italian SMEs. *Management Control*, 2023(2 Suppl.). <https://shorturl.at/ZyNm7>.
59. Paraskevoudis, K., Karayannis, P., and Koumoulos, E. P. (2020). Real-Time 3D Printing Remote Defect Detection (Stringing) with Computer Vision and Artificial Intelligence. *Processes*, 8(11), 1464. <https://doi.org/10.3390/pr8111464>.
60. Parlamento Europeo (2024). *Regolamento (UE) 2024/1689 sull'intelligenza artificiale*. Parlamento Europeo. <https://shorturl.at/ScIny>.
61. Paśko, Ł., Mądziel, M., Stadnicka, D., Dec, G., Carreras-Coch, A., Solé-Beteta, X., and Atzeni, D. (2022). Plan and develop advanced knowledge and skills for future industrial employees in the field of artificial intelligence, internet of things and edge computing. *Sustainability*, 14(6), 3312. <https://doi.org/10.3390/su14063312>.
62. Patel, K. (2024). Ethical Reflections On Data-Centric AI: Balancing Benefits And Risks. SSRN: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4993089>.
63. Pejić, M., Zoroja, J., and Bosilj Vukšić, V. (2013). Determinants of Firms' Digital Divide: A Review of Recent Research. *Procedia Technology*, 9:120-128. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.013>
64. Peres, R. S., Jia, X., Lee, J., Sun, K., and Colombo, A. W. (2020). Industrial Artificial Intelligence in Industry 4.0 - Systematic Review, Challenges and Outlook. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3042874>.



65. Ponti, C. (2025). Continent Action Plan: così cambia la strategia europea sull'intelligenza artificiale. *Cybersecurity360*. <https://shorturl.at/jN029>.
66. Raptis, T. P., Passarella, A., and Conti M. (2019). Data Management in Industry 4.0: State of the Art and Open Challenges. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2929296>.
67. Rasheed, M. Q., Yuhuan, Z., Haseeb, A., Ahmed, Z., and Saud, S. (2024). Asymmetric relationship between competitive industrial performance, renewable energy, industrialization, and carbon footprint: Does artificial intelligence matter for environmental sustainability?. *Applied energy*, 367, 123346. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123346>.
68. Rathore, M. M., Shah, S. A., Shukla, D., Bentafat, E. and Bakiras, S. (2021). The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic Literature Review, Challenges, and Opportunities. *IEEE Access*, 9, 32030-32052. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060863>.
69. Ronaghi, M. H. (2023). The influence of artificial intelligence adoption on circular economy practices in manufacturing industries. *Environment, Development and Sustainability*, 25(12), 14355-14380. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02670-3>.
70. Sartal A., Bellas R., Mejías A.M., García-Collado A. (2014). The sustainable manufacturing concept, evolution and opportunities within Industry 4.0: A literature review. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(5). <https://doi.org/10.1177/1687814020925232>.
71. Sashikala, V., Karthik, P., Satish Kumar Das, S. L. S., Laxman Shamrao Survase, D. R. V. (2025). The Role of Artificial Intelligence in Advancing Green Management through Digital Transformation. *International Journal of Environmental Science*, 51-60.
72. Schmitt, M., and Cummins, M. (2023). Beyond Accuracy in Artificial Intelligence Based Credit Scoring Systems: Explainability and Sustainability in Decision Support. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4536400>.
73. Shumskaia, E. I. (2022). Artificial intelligence—reducing the carbon footprint?. In Zavyalova E. B., and Popkova E. G. (eds). *Industry 4.0: Fighting climate change in the economy of the future*. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79496-5_33.
74. Siemens (n.d.). Automazione e gestione sostenibile dell'energia. <https://www.siemens.com/>.
75. Singh, M., Srivastava, R., Fuenmayor, E., Kuts, V., Qiao, Y., Murray, N., and Devine, D. (2022). Applications of Digital Twin across Industries: A Review. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app12115727>.
76. Smyth, C., Dennehy, D., Wamba, S. F., Scott, M., and Harfouche, A. (2024). Artificial intelligence and prescriptive analytics for supply chain resilience: a systematic literature review and research agenda. *International Journal of Production Research*, 62(23), 8537-8561. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2341415>.



77. Sorokina, A., and Lebedeva, L. (2025). The impact of digital transformation on enterprises' resilience: evidence from Ukraine. *Agora international journal of economical sciences*, 19(1), 303-314. <https://doi.org/10.15837/aijes.v19i1.7161>.
78. The European House Ambrosetti (2025). *InnoTech Report 2025*. The European House Ambrosetti. <https://shorturl.at/2uGjh>.
79. Tupa, J., Simota, J., and Steiner, F. (2017). Aspects of risk management implementation for Industry 4.0. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.248>.
80. Van Der Vlist, F., Helmond, A., and Ferrari, F. (2024). Big AI: Cloud infrastructure dependence and the industrialisation of artificial intelligence. *Big Data and Society*, 11(1), 20539517241232630. <https://doi.org/10.1177/20539517241232630>.
81. Van Der Vlist, F., Helmond, A., and Ferrari, F. (2020). The relation between 21st-century skills and digital skills: A systematic literature review. *Science Direct*. <https://doi.org/10.1177/2158244019900176>
82. Waltersmann, L., Kiemel, S., Stuhlsatz, J., Sauer, A., and Mieke, R. (2021). Artificial intelligence applications for increasing resource efficiency in manufacturing companies—a comprehensive review. *Sustainability*, 13(12), 6689. <https://doi.org/10.3390/su13126689>.
83. Wan, J., Li, X., Dai, H.-N., Kusiak, A., Martínez-García, M., and Li, D. (2021). Artificial-Intelligence-Driven Customized Manufacturing Factory: Key Technologies, Applications, and Challenges. *Proceedings of the IEEE*. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3034808>.
84. Wang, Q., Li, Y., and Li, R. (2024). Ecological footprints, carbon emissions, and energy transitions: the impact of artificial intelligence (AI). *Humanities and Social Sciences Communications*, 11(1), 1-18. <https://doi.org/10.1057/s41599-024-03520-5>.
85. World Economic Forum. L'impatto dell'Industria 4.0 sulla sostenibilità. <https://www.weforum.org/>.
86. Wynarczyk, P., Piperopoulos, P., and McAdam, M. (2013). Open innovation in small and medium-sized enterprises: An overview. *International Small Business Journal*, 31(3), 240-255. <https://doi.org/10.1177/0266242612472214>.
87. Xiao, L., Cao, H. (2017). Organizational Resilience: The Theoretical Model and Research Implication. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20171204021>.
88. Zeid, A., Sundaram, S., Moghaddam, M., Kamarthi, S., and Marion, T. (2019). Interoperability in Smart Manufacturing: Research Challenges. *Machines*, 7(2), 21. <https://doi.org/10.3390/machines7020021>.
89. Zha, D., Bhat, Z. P., Lai, K.-H., Yang, F., Zhimeng, J., Zhong, S. and Hu, X. (2025). Data-centric Artificial Intelligence: A Survey. *ACM Computing Surveys*, 57(5), 1-42. <https://doi.org/10.1145/3711118>.



90. Su, Y., Zhou, J., Ying, J., Zhou, M., and Zhou, B. (2021). Computing infrastructure construction and optimization for high-performance computing and artificial intelligence. *CCF Transactions on High Performance Computing*, 3(4), 331-343. <https://doi.org/10.1007/s42514-021-00080-x>.
91. Zhuk, A. (2023). Artificial intelligence impact on the environment: Hidden ecological costs and ethical-legal issues. *Journal of Digital Technologies and Law*, 1(4), 932-954. <https://doi.org/10.21202/jdtl.2023.40>.
92. Zong, Z., and Guan, Y. (2025). AI-driven intelligent data analytics and predictive analysis in Industry 4.0: Transforming knowledge, innovation, and efficiency. *Journal of the Knowledge Economy*, 16(1), 864-903. <https://doi.org/10.1007/s13132-024-02001-z>.
93. Zonta, T., Da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., Da Trindade, E. S., and Li, G. P. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers and industrial engineering*, 150, 106889. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>.