



Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale
A.A. 2024/2025
Sessione di Laurea novembre 2025

Industria 4.0 e trasformazione digitale: lo stato dell'arte dei Digital Twin nelle aziende italiane

Progettazione di un'indagine di mercato per valutare l'utilizzo
presente o il potenziale utilizzo futuro dei Digital Twin nelle aziende
italiane

Relatore:

Prof.ssa Elisa Verna

Candidato:

Alessandro Porcu

Co-Relatore:

Prof. Maurizio Galetto

RINGRAZIAMENTI

“Tutto accade quando deve accadere. Il tempo ha la sua perfezione.” (Paulo Coelho)

A 55 anni, dopo un lungo viaggio fatto di pause, riprese, sacrifici e sogni mai abbandonati, arrivo alla laurea. Un traguardo che non è solo accademico, ma profondamente umano. Quando iniziai questo percorso, ero un giovane individuo in cerca di sé stesso. Oggi, sono marito, padre, e uomo consapevole del valore del tempo, della resilienza e dell'amore.

Questa laurea non è solo mia. È di chi ha creduto in me quando io stesso faticavo a farlo. È di chi ha ascoltato i miei dubbi e incoraggiato le mie scelte. È di chi ha saputo aspettare, comprendere, sostenere.

Ringrazio il Prof. Galetto, relatore, e la Dott.ssa Verna, co-relatrice. Grazie per avermi dato la possibilità di confrontarmi con una tesi impegnativa, stimolante e ricca di sfide. È stato un percorso che ha richiesto impegno, riflessione e costanza, ma che mi ha anche permesso di crescere, di approfondire e di mettermi alla prova. La vostra disponibilità, la gentilezza con cui avete accolto ogni mia domanda, e la puntualità nei suggerimenti forniti sono stati fondamentali.

Ringrazio la mia famiglia, che ha reso possibile ciò che sembrava impossibile.

Mia moglie Mirna, per la forza “silenziosa” e il sorriso che non ha mai smesso di illuminare i miei giorni.

Mio figlio Alessandro Andrea, per i suggerimenti preziosi, per lo sguardo lucido e concreto, per avermi aiutato a vedere con chiarezza anche quando la stanchezza offuscava la mente.

Mia figlia Rebecca Anais, per quella presenza delicata e profonda che ha saputo accompagnarmi senza parole, ma con una forza che solo chi ama sa trasmettere.

Un pensiero speciale va a mio padre, che non è più fisicamente accanto a me, ma che continua a vivere in ciò che sono. Da lui ho imparato l'attitudine all'attenzione, alla curiosità, al rispetto per la conoscenza. Questa laurea è anche sua.

Ringrazio mia madre, che a modo suo mi ha dato una mano. Anche lei ha contribuito a questo traguardo, con quella forza che solo una madre sa avere.

E sì, ringrazio anche l'Altro Ale, il mio Giudice Interiore, che per anni mi ha fatto sentire inadatto, fuori posto, in ritardo. A quella voce severa che mi ha messo alla prova, ma che oggi può finalmente fare silenzio. Perché ora è il momento di gioire, di celebrare, di riconoscere il valore di ciò che ho raggiunto. Nonostante tutto. O forse proprio grazie a tutto.

Ultimo, ma non ultimo, il ringraziamento più sentito. Ringrazio me stesso. Il bambino che ero, che non ha mai smesso di sognare. A quell'anima curiosa, tenace, che ha saputo resistere, reinventarsi, rialzarsi. A me, che ho creduto che fosse ancora possibile, anche quando sembrava tardi. Questa laurea è il frutto di quel sogno, coltivato nel tempo, custodito nel cuore. E oggi, con orgoglio e gratitudine, posso abbracciare quel bambino e dirgli: "Hai avuto ragione a non smettere di crederci".

Chiudere questo ciclo è un atto di gratitudine. Non per dimenticare, ma per onorare. Perché ogni passo, ogni ostacolo, ogni caduta e ogni risalita mi hanno portato qui. E ora, con il cuore colmo di gioia, posso dire: "Ce l'ho fatta!".

Grazie a tutti quelli che hanno camminato con me, quadrupedi inclusi!

Grazie Ale. Di cuore.

Indice

RINGRAZIAMENTI	1
Indice figure, tabelle e grafici	7
INTRODUZIONE.....	9
Contesto e motivazioni della ricerca	9
Obiettivi della tesi.....	9
Struttura del lavoro	10
1 INDUSTRIA 4.0: CONTESTO, TECNOLOGIE E DIFFUSIONE	11
1.1 Introduzione all'Industria 4.0	11
1.1.1 Definizione e significato.....	11
1.1.2 La quarta rivoluzione industriale	11
1.1.3 Impatti sui modelli organizzativi e produttivi.....	12
1.1.4 Come cambia il modello di organizzazione con l'industria 4.0	13
1.2 Le tecnologie abilitanti	13
1.2.1 Panoramica delle tecnologie 4.0	13
1.2.2 Digital Twin, IoT, Big Data, AI, robotica collaborativa	15
1.2.3 Impatto sulle fabbriche e sulla supply chain	15
1.3 Politiche e iniziative in Italia	16
1.3.1 Il Piano Nazionale Industria 4.0	16
1.3.2 Evoluzione verso Transizione 4.0 e Transizione 5.0	18
1.3.3 I Competence Center.....	18
1.3.4 Il ruolo del MADE per connettere PMI e tecnologie 4.0	19
1.4 Adozione dell'Industria 4.0 in Italia	21
1.4.1 Stato dell'adozione: dati e statistiche	21
1.4.2 Casi aziendali: FCA, Pirelli, Luxottica	21
1.4.3 Opportunità e criticità per le PMI italiane.....	22
1.5 Confronto internazionale	22
1.5.1 Europa.....	22
1.5.2 Stati Uniti	23
1.5.3 Posizionamento dell'Italia	23
2. DIGITAL TWIN	25
2.1 Definizione e funzionamento del modello Digital Twin	25
2.2 Architettura e funzionamento.....	29
2.3 Tecnologie abilitanti	30
2.4 Applicazioni industriali dei Digital Twin.....	31
2.4.1 Applicazioni nel settore manifatturiero	32

2.4.2. Agricoltura e agri-tech	33
2.4.3. Applicazioni nel settore sanitario	34
2.4.4 Applicazioni nell'industria automobilistica.....	36
2.4.5 Applicazioni nel settore aeronautico/aerospaziale	37
2.4.6 Applicazioni nel settore delle costruzioni civili e industriali.....	38
2.4.6 Applicazioni nel settore energetico e delle utilities	39
2.4.7 Applicazioni nel settore minerario ed estrattivo.....	40
2.4.8 Applicazioni nel settore Retail & Customer Experience	41
2.5 Sintesi comparativa	43
2.6 Vantaggi, criticità e prospettive future.....	43
3. METODOLOGIA DELL'INDAGINE.....	46
3.1 Obiettivo dell'indagine	46
3.2 Struttura e contenuti del questionario.....	46
3.3 Target di riferimento e modalità di somministrazione.....	48
3.3.1 Strategie di selezione del campione	48
3.3.2 Modalità di somministrazione.....	50
3.3.3 Criteri di inclusione e validazione del campione	50
3.4 Campione rispondente: descrizione e caratteristiche.....	50
3.4.1 Settore di appartenenza	50
3.4.2 Dimensione aziendale	51
3.4.3 Ruolo del rispondente	51
3.5 Strumenti di analisi dei dati.....	51
3.5.1 Software utilizzati	51
3.5.2 Tipologie di analisi svolte.....	52
3.5.3 Validazione e trattamento dei dati.....	52
4. RISULTATI DELL'INDAGINE.....	53
4.1 Profilo delle aziende rispondenti.....	53
4.1.1 Settore di appartenenza	53
4.1.2 Ambito di attività	54
4.1.3 Dimensione aziendale	54
4.1.4 Ruolo del rispondente	55
4.1.5 Fatturato aziendale.....	55
4.1.6 Mercati serviti.....	55
4.1.7 Anno di fondazione.....	56
4.1.8 Modalità di vendita.....	56
4.1.9 Presenza di fornitori principali	56

4.1.10 Numero di fornitori principali.....	57
4.1.11 Concentrazione del fatturato sui clienti più importanti.....	58
4.1.12 Settore di mercato in cui opera il cliente principale	58
4.1.13 Quota di mercato detenuta (Italia).....	58
4.1.14 Stagionalità o fluttuazioni della domanda.....	59
4.1.15 Strategie per la gestione di picchi e fluttuazioni stagionali.....	60
4.1.16 Partecipazione a iniziative per l'innovazione	60
4.1.17 Conclusioni	60
4.2 Livello di conoscenza del paradigma Industria 4.0.....	62
4.2.1 Conoscenza delle tecnologie	62
4.2.2 Conoscenza di bandi e finanziamenti per lo sviluppo tecnologico e l'Industria 4.0.....	64
4.2.3 Di quali bandi/finanziamenti è a conoscenza?	64
4.2.4 Conoscenza delle normative europee sulla gestione dei dati (GDPR)	65
4.2.5 Azione attuate o da attuare per adeguarsi alla normativa	65
4.2.6 Disponibilità a permettere l'accesso ai dati aziendali da parte di servizi esterni.....	65
4.2.7 Grado di accessibilità da esterno ritenuto adeguato alle diverse tipologie di dato.....	66
4.2.8 Conoscenza dei criteri di sicurezza riguardo i dati informatici e alle tematiche in ambito Cybersecurity	67
4.2.9 Tecniche di sicurezza informatiche adottate.....	68
4.2.10 Conoscenza delle soluzioni Cloud.....	68
4.2.11 Conclusioni	69
4.3 Implementazione effettiva dei concetti di Industria 4.0.....	71
4.3.1 Attività ritenute importanti per l'azienda	71
4.3.2 Grado di implementazione delle tecnologie 4.0	72
4.3.3 Benefici attesi dall'implementazione delle tecnologie 4.0 già in uso e di quelle che si è predisposti ad adottare	74
4.3.4 Implementazione di un piano strategico per l'innovazione	75
4.3.5 Conclusioni	75
4.4 Conoscenza, implementazione e utilizzo dei Digital Twin (DT).....	77
4.4.1 Conoscenza del concetto di DT.....	77
4.4.2 Tecnologie digitali usate nell'azienda.....	77
4.4.3 Conoscere il significato e la potenzialità delle tecnologie di Digital Twin	78
4.4.4 Reputa utile, per la sua attività, la possibilità di avere informazioni in tempo reale sullo stato dei propri macchinari, dell'intera linea produttiva e sulle attività svolte dai dipendenti?	78
4.4.5 Importanza delle implementazioni.....	78
4.4.6 Tutti i benefici dei Digital Twin sono ad oggi oggetto di incentivi statali riguardo l'Industria 4.0. Sarebbe disposto ad investire su tali implementazioni?	81

4.4.7 Investimenti in Industria 4.0 effettuati negli ultimi 3 anni e miglioramenti effettivi.....	81
4.4.8 Se ha effettuato o pensa di effettuare investimenti nell'Industria 4.0, in che lasso di tempo si aspetta di averne un ritorno economico?	82
4.4.9 Settori in cui il Digital Twin potrà trovare nuovi ambiti di applicazione	82
4.4.10 Utilità dei DT nella catena del valore e dei processi manageriali e decisionali.....	83
4.4.11 Implementazioni di tecnologie Digital Twin nei processi aziendali dei rispondenti	84
4.4.12 Quali sono gli ambiti in cui il Digital Twin potrà trovare nuovi spazi di applicazione?	84
4.4.13 Quali sono i principali benefici che i DT hanno portato alla sua azienda.....	85
4.4.14 Principali ostacoli all'adozione dei DT	86
4.4.15 Motivi per cui non si ritiene utile adottare tecnologie DT	86
4.4.16 Conclusioni	87
5. DISCUSSIONE DEI RISULTATI, IMPLICAZIONI E CONCLUSIONI.....	89
5.1 Discussione critica dei risultati	89
5.2 Implicazioni per le imprese.....	90
5.3 Implicazioni per i policy maker	90
5.4 Limiti della ricerca.....	91
5.5 Direzioni future di ricerca	91
5.6 Conclusioni finali.....	91
Bibliografia.....	92
ALLEGATO 1	105
1.1 Questionario	106

Indice figure, tabelle e grafici

Figura 1. Le 4 rivoluzioni industriali (fonte EconomyUp)	12
Figura 2. Caratteristiche della Fabbrica 4.0.....	12
Figura 3. Industria 4.0 (fonte EconomyUp)	14
Figura 4. Le principali tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 (rielaborazione da Osservatori Digital Innovation, 2023)	15
Figura 5. Piano Nazionale Industria 4.0 (fonte: Cabina di Regia Industria 4.0)	16
Figura 6. Il valore del mercato 4.0 i Italia (fonte Osservatorio Industria 4.0)	24
Figura 7. Conceptual Ideal for PLM (Fonte M. Grieves e J. Vickers, Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems)	25
Figura 8. Differenze tra Digital Model, Digital Shadow e Digital Twin	29
Figura 9. Tecnologie abilitanti per i Digital Twin (Fonte: [181])	30
Figura 10. Settori industriali che utilizzano i Digital Twin (Fonte: [181])	31
Figura 11. Distribuzione per settore di appartenenza.....	50
Tabella 1. I Competence Center in Italia e la loro graduatoria (fonte Competence Center I4.0)	19
Tabella 2. Soggetti ammessi al finanziamento relativi al bando per la selezione di progetti di innovazione, ricerca industriale e sviluppo sperimentale del 1° marzo 2021 (fonte MADE. Competence Center I4.0).....	20
Tabella 3. Programmi industria 4.0 nel mondo (fonte MISE Piano Nazionale Industria 4.0).....	23
Tabella 4. Comparazione cronologica definizioni DT	28
Tabella 5. Applicazioni Digital Twin nel settore agri-tech. Esempi italiani [136]	34
Tabella 6. Applicazioni Digital Twin nel settore sanitario. Esempi italiani [137]	35
Tabella 7. Applicazioni Digital Twin nel settore automobilistico. Esempi italiani [138].....	36
Tabella 8. Applicazioni Digital Twin nel settore aeronautico/aerospaziale. Esempi italiani [139].....	37
Tabella 9. Applicazioni Digital Twin nel settore delle costruzioni civili e industriali. Esempi italiani [140]	39
Tabella 10. Applicazioni Digital Twin nel settore energetico e delle utilities. Esempi italiani [141]	40
Tabella 11. Applicazioni Digital Twin nel settore minerario ed estrattivo. Esempi italiani [142]	41
Tabella 12. Applicazioni Digital Twin nel settore del retail e customer experience. Esempi italiani [143]....	42
Tabella 13. Codici ATECO utilizzati per estrazione aziende	49
Tabella 14. Azioni attuate per adeguarsi alla normativa GDPR.....	65
Tabella 15. Attività importanti per l'azienda	72
Tabella 16. Tabella aggregata grado di implementazione tecnologie 4.0.....	72
Tabella 17. Benefici attesi dall'implementazione delle tecnologie 4.0	74
Tabella 18. Importanza delle implementazioni	80

Tabella 19. Investimenti ti effettuati negli ultimi 3 anni in tecnologie per l'industria 4.0	81
Tabella 20. Ritorno economico degli investimenti nell'industria 4.0	82
Grafico 1. Distribuzione per settore di appartenenza.....	53
Grafico 2. Distribuzione per ambito di attività	54
Grafico 3. Distribuzione per dimensione aziendale.....	54
Grafico 4. Distribuzione per fascia di Fatturato annuo in milioni di euro	55
Grafico 5. Mercati serviti.....	56
Grafico 6. Numero di fornitori principali dichiarati dalle aziende	57
Grafico 7. Percentuale di fatturato generata dai clienti principali.....	58
Grafico 8. Quota di mercato detenuta dall'Azienda a livello nazionale	59
Grafico 9. Presenza di stagionalità o picchi negli ordini.....	59
Grafico 10. Strategie per gestire picchi o stagionalità.....	60
Grafico 11. Fonti informative per il concetto di industria 4.0	62
Grafico 12. Conoscenza delle tecnologie industria 4.0	63
Grafico 13. Bandi o strumenti di finanziamento conosciuti.....	64
Grafico 14. Disponibilità a condividere i dati con esterno	66
Grafico 15. Motivazioni alla non condivisione dei dati aziendali	66
Grafico 16. Grado di accessibilità ritenuto adeguato alle diverse tipologie di dato	67
Grafico 17. Tecniche di sicurezza informatiche adottate	68
Grafico 18. Disponibilità alla condivisione dei dati aziendali per servizi Cloud.....	69
Grafico 19. Grado di effettiva implementazione tecnologie 4.0	73
Grafico 20. Implementazione piano di innovazione.....	75
Grafico 21. Tecnologie digitali usate in azienda	77
Grafico 22. Importanza delle implementazioni.....	79
Grafico 23. Apertura all'implementazione della tecnologia die DT	81
Grafico 24. Ambiti di futura applicazione dei DT.....	83
Grafico 25. Utilità dei DT nella catena del valore e nei processi manageriali e decisionali	84
Grafico 26. Ambiti futuri di applicazione dei DT.....	85
Grafico 27. Benefici riscontrati dall'adozione dei DT nelle aziende rispondenti.....	85
Grafico 28. Principali ostacoli all'adozione dei DT.....	86
Grafico 29. Motivi per cui non si ritiene utile adottare tecnologie DT.....	87

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, il concetto di Industria 4.0 ha guadagnato un'importanza crescente nel panorama economico, industriale e accademico. Questa nuova fase evolutiva del sistema produttivo, guidata dalla trasformazione digitale e dall'integrazione tra tecnologie fisiche e virtuali, sta rivoluzionando il modo in cui le imprese progettano, producono e distribuiscono beni e servizi. Tra le tecnologie emergenti che stanno progressivamente guadagnando attenzione vi è il Digital Twin, ovvero la replica virtuale di oggetti, processi o sistemi fisici, capace di interagire dinamicamente con la controparte reale grazie all'uso integrato di Internet of Things (IoT), Big Data, Intelligenza Artificiale e modelli predittivi.

In Italia, come in altri Paesi industrializzati, il tema dei Digital Twin è ancora in una fase di maturazione. Nonostante il loro potenziale applicativo sia stato ampiamente riconosciuto in ambito produttivo, logistico e manutentivo, resta da chiarire quanto siano effettivamente conosciuti e utilizzati all'interno delle imprese italiane, in particolare nelle piccole e medie imprese (PMI) che costituiscono l'ossatura del sistema industriale nazionale.

Contesto e motivazioni della ricerca

L'interesse per questa ricerca nasce dall'esigenza di comprendere meglio il livello di diffusione e di consapevolezza legato ai Digital Twin nel contesto imprenditoriale italiano. Se da un lato i grandi gruppi industriali sembrano aver già avviato processi di adozione tecnologica avanzata, dall'altro lato le PMI spesso si trovano in una posizione di ritardo tecnologico dovuto a limiti strutturali, finanziari e culturali.

Alla luce di ciò, è rilevante esplorare se e in che misura le aziende italiane conoscano i Digital Twin, li adottino attualmente, oppure ne prevedano un utilizzo futuro. L'indagine si inserisce in un momento storico cruciale, in cui le politiche pubbliche (come il Piano Transizione 4.0) [1] stanno incentivando la digitalizzazione dei processi produttivi attraverso strumenti di supporto economico e formativo.

L'obiettivo è quindi quello di colmare un gap conoscitivo, offrendo un quadro aggiornato e attendibile basato su evidenze empiriche, che possa essere utile sia per fini accademici che per eventuali implicazioni manageriali o istituzionali.

Obiettivi della tesi

La presente tesi si propone di raggiungere i seguenti obiettivi principali:

- Analizzare lo stato dell'arte relativo ai Digital Twin in letteratura e nei contesti industriali internazionali.
- Progettare e somministrare una survey rivolta alle aziende italiane per indagare il livello di conoscenza, l'adozione attuale e l'interesse futuro verso i Digital Twin.
- Analizzare in modo quantitativo i dati raccolti, evidenziando differenze tra settori, dimensioni aziendali e ruoli dei rispondenti.
- Identificare eventuali barriere percepite all'adozione della tecnologia e fornire raccomandazioni per favorirne la diffusione.
- Valutare l'impatto potenziale dei Digital Twin sul processo di trasformazione digitale delle imprese italiane.

Struttura del lavoro

La tesi è articolata in cinque capitoli, oltre alla presente introduzione.

Il Capitolo 1 fornisce un inquadramento teorico sull’Industria 4.0, approfondendo il contesto storico, le tecnologie abilitanti e il panorama italiano ed europeo della digitalizzazione industriale.

Il Capitolo 2 è dedicato ai Digital Twin, con una definizione tecnica, una panoramica sulle principali applicazioni nei settori industriali, e un’analisi dello stato dell’adozione a livello globale e nazionale.

Il Capitolo 3 descrive la metodologia della ricerca, illustrando la progettazione del questionario, il campione coinvolto, le modalità di raccolta dati e gli strumenti utilizzati per l’analisi.

Il Capitolo 4 presenta i risultati dell’indagine empirica, mettendo in evidenza i principali trend emersi, le criticità riscontrate e le potenzialità individuate.

Il Capitolo 5 propone una discussione critica dei risultati, un bilancio complessivo dell’analisi svolta e una riflessione sui limiti della ricerca e sulle possibili direzioni future di approfondimento offrendo spunti di riflessione e raccomandazioni utili sia per il mondo aziendale sia per i policy maker.

1 INDUSTRIA 4.0: CONTESTO, TECNOLOGIE E DIFFUSIONE

1.1 Introduzione all'Industria 4.0

Negli ultimi anni, il concetto di *Industria 4.0* ha assunto un ruolo centrale nel dibattito accademico, politico e industriale, diventando sinonimo di una trasformazione profonda dei processi produttivi e organizzativi [1]. Il termine nasce in Germania nel 2011 all'interno di un progetto strategico volto a rilanciare la competitività industriale attraverso l'integrazione tra tecnologie digitali e sistemi fisici [2]. In questo contesto, l'Industria 4.0 si configura come la quarta rivoluzione industriale, dopo la meccanizzazione (prima rivoluzione), l'elettrificazione e produzione di massa (seconda) e l'automazione informatica (terza) [3]. L'industria 4.0 è da alcuni anni al centro della trasformazione economica in Italia e nel mondo [4].

Nel nostro Paese è stato varato nel 2016 un piano governativo ad hoc che ha poi subito evoluzioni e revisioni: da Piano Industria 4.0 a Piano Impresa 4.0 al Piano Nazionale della Transizione 4.0 fino alla Transizione 5.0 [5]. Durante la pandemia da Covid19 l'Industry 4.0 e le tecnologie ad essa collegate si sono rivelate fondamentali per contrastare la crisi [6]. A febbraio 2021 il presidente del Consiglio Mario Draghi ha espresso la necessità di “estendere e rendere facilmente fruibile il piano nazionale della Transizione 4.0 per accompagnare le imprese nel processo di innovazione tecnologica e di sostenibilità ambientale” [7].

1.1.1 Definizione e significato

L'industria 4.0 è un processo che scaturisce dalla quarta rivoluzione industriale e che sta portando alla produzione industriale del tutto automatizzata, intelligente e interconnessa [1]. Le nuove tecnologie digitali avranno un impatto profondo nell'ambito di quattro direttive di sviluppo [4] [6]:

1. Utilizzo dei dati, potenza di calcolo e connettività. Si declina in big data, open data, Internet of Things, machine-to-machine e cloud computing per la centralizzazione delle informazioni e la loro conservazione;
2. Analytics e intelligenza artificiale. Una volta raccolti i dati, bisogna ricavarne valore. Oggi solo l'1% dei dati raccolti viene utilizzato dalle imprese, che potrebbero invece ottenere vantaggi a partire dal “machine learning”, dalle macchine, cioè, che perfezionano la loro resa “imparando” dai dati via via raccolti e analizzati;
3. Interazione uomo-macchina. Basata su interfacce e robot collaborativi (COBOT) per un ambiente produttivo flessibile e sicuro
4. Passaggio dal digitale al “reale”. Comprende la manifattura additiva, la stampa 3D, la robotica, le comunicazioni, le interazioni machine-to-machine e le nuove tecnologie per immagazzinare e utilizzare l'energia in modo mirato, razionalizzando i costi e ottimizzando le prestazioni [8]

L'espressione Industria 4.0 è stata usata per la prima volta alla Fiera di Hannover nel 2011 in Germania. A ottobre 2012 un gruppo di lavoro dedicato all'Industria 4.0, presieduto da Siegfried Dais della multinazionale di ingegneria ed elettronica Robert Bosch GmbH e da Henning Kagermann della Acatech (Accademia tedesca delle Scienze e dell'Ingegneria) presentò al governo federale tedesco una serie di raccomandazioni per la sua implementazione. L'8 aprile 2013, all'annuale Fiera di Hannover, fu diffuso il report finale del gruppo di lavoro [1].

1.1.2 La quarta rivoluzione industriale

Finora le rivoluzioni industriali del mondo occidentale sono state tre [3] [10].

La Prima Rivoluzione Industriale (circa 1784) segnata dall'introduzione della macchina a vapore e dallo sfruttamento della potenza di acqua e vapore per meccanizzare la produzione.

La Seconda Rivoluzione Industriale (circa 1870) caratterizzata dalla produzione di massa, resa possibile dall'uso diffuso dell'elettricità, dal motore a combustione interna e dall'impiego del petrolio come nuova fonte energetica [11].

La Terza Rivoluzione Industriale (circa 1970) coincidente con l'avvento dell'informatica, dell'elettronica e delle tecnologie dell'informazione (IT), che hanno introdotto livelli crescenti di automazione e integrazione nei processi produttivi [10].

Come si vede in figura 1, la data d'inizio della Quarta Rivoluzione Industriale non è ancora stabilita, probabilmente perché è tuttora in corso e solo a posteriori sarà possibile indicarne l'atto fondante.

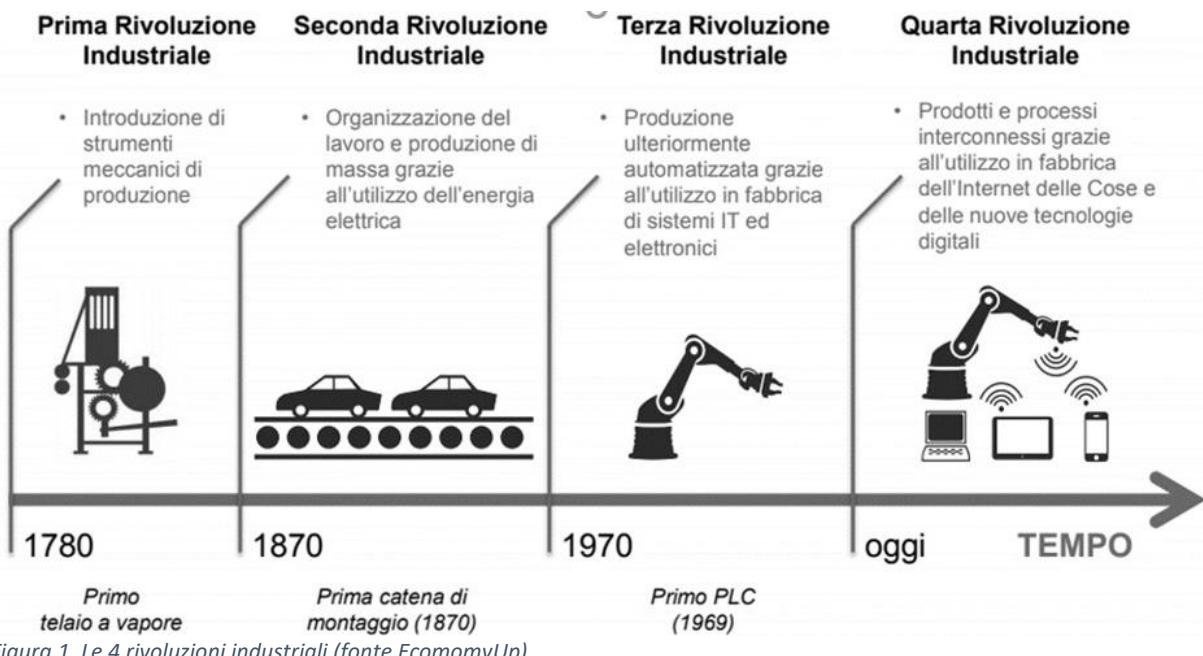


Figura 1. Le 4 rivoluzioni industriali (fonte EconomyUp)

L'argomento è stato al centro del World Economic Forum 2016, dal 20 al 24 gennaio a Davos (Svizzera), intitolato appunto "Mastering the Fourth Industrial Revolution" [12]. Ma anche nelle successive edizioni del WEF l'Industria 4.0 ha inevitabilmente continuato ad affacciarsi al dibattito [13].

1.1.3 Impatti sui modelli organizzativi e produttivi

Come mostrato in figura 2 la Fabbrica 4.0, figlia della quarta rivoluzione industriale, è composta di macchine completamente interconnesse tra loro, che dialogano le une con le altre ed effettuano autodiagnosi e manutenzione preventiva [14]. In particolare, secondo un rapporto elaborato da GE Digital con la società di ricerca indipendente Vanson Bourne, la manutenzione dei macchinari da parte dei macchinari stessi, grazie all'IoT, supererà per qualità, capacità e velocità quella realizzata da operatori umani, consentendo alle fabbriche di anticipare i guasti e ottimizzare i processi produttivi [15].

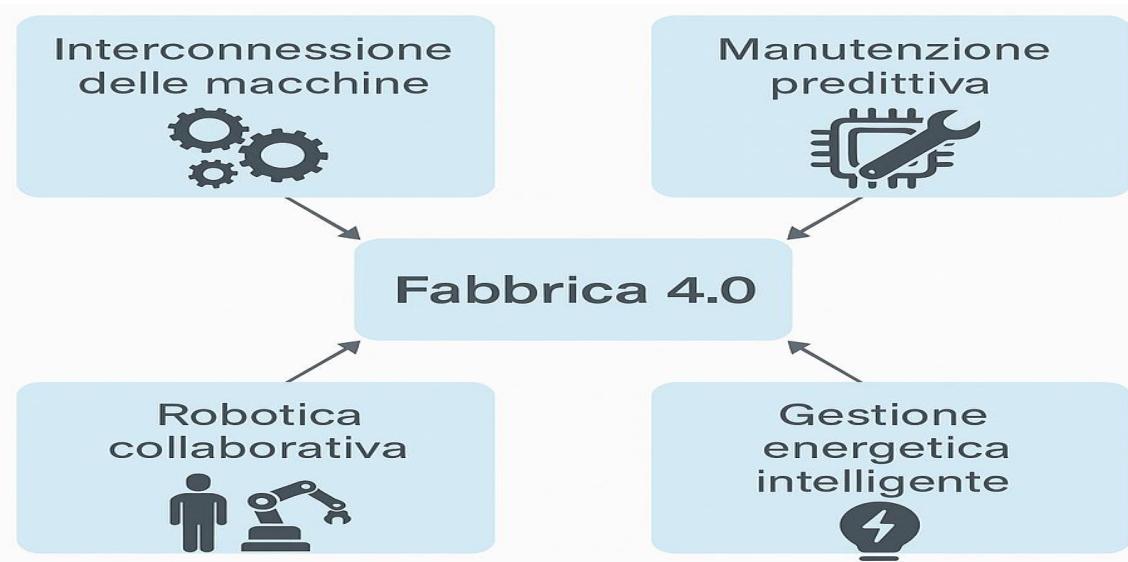


Figura 2. Caratteristiche della Fabbrica 4.0

I progressi dell’evoluzione tecnologica porteranno le fabbriche a prevedere in autonomia il grado di fallimento produttivo, a adottare le migliori misure di prevenzione e a mettere in campo azioni di auto-riparazione [1].

Inoltre, nella Fabbrica 4.0 la flessibilità dagli impianti sarà tale da consentire di personalizzare i prodotti in funzione del singolo cliente [16]. I robot collaborativi (cobot) lavoreranno a stretto contatto con gli esseri umani, apprendendo dai loro comportamenti e migliorando progressivamente le proprie prestazioni attraverso algoritmi di machine learning [17]. Inoltre, l’intero flusso produttivo potrà essere riprodotto e testato in ambienti virtuali, così da verificare le prestazioni prima della messa in opera fisica e ottimizzare la configurazione degli impianti [18].

Infine, la Fabbrica 4.0 sarà anche energeticamente intelligente e integrerà sistemi di monitoraggio e gestione dell’energia basati su intelligenza artificiale, in grado di ridurre gli sprechi e ottimizzare i costi operativi, in una parola sarà una smart factory [8].

1.1.4 Come cambia il modello di organizzazione con l’industria 4.0

“Industria 4.0 non significa solo introdurre nuovi macchinari in azienda ma anche e soprattutto cambiare modello di organizzazione”. Lo sostiene Luciano Pero, docente di Theory and Design al MIP-Politecnico di Milano che da anni studia l’impatto dei paradigmi digitali sulle strutture organizzative e sui modelli di leadership [19]. La tesi che emerge da molte ricerche e dai dati Istat è che due imprese italiane su tre incontrano difficoltà non tanto di natura tecnologica, quanto culturale e organizzativa, nell’adottare una struttura produttiva coerente con la prospettiva dell’economia globalizzata e con le logiche della trasformazione digitale [20] [21].

Al netto di cause di contesto, come la scarsità di investimenti pubblici, la lentezza della giustizia o la pressione fiscale elevata e di difficoltà strutturali legate alla dimensione media delle imprese italiane, ad esempio l’elevata mortalità dei passaggi generazionali o la difficoltà di accesso al credito [22], la vera barriera all’adozione di un modello 4.0 risiede in un ritardo culturale e organizzativo [20][23].

Permane infatti l’idea, ormai superata, che l’organizzazione di fabbrica debba restare chiusa, gerarchica e centrata sul controllo dei costi, mentre la Fabbrica 4.0 richiede un modello aperto, collaborativo e reticolare, basato su autonomia, apprendimento continuo e integrazione uomo-macchina [24] [1].

Secondo Pero, l’unica strada percorribile è la cosiddetta “via alta” dell’innovazione, che non si limita all’acquisizione di tecnologie digitali, ma valorizza le competenze, la partecipazione e la co-progettazione organizzativa come leve strategiche per la competitività e la sostenibilità nel lungo periodo [23].

1.2 Le tecnologie abilitanti

L’Industria 4.0 si fonda su un insieme di tecnologie digitali avanzate, note come *tecnologie abilitanti*, capaci di trasformare radicalmente i processi produttivi, logistici e decisionali delle imprese [1] [8]. Queste tecnologie non operano in modo isolato, ma attraverso un approccio integrato, dando origine a sistemi intelligenti, interconnessi e adattivi, in grado di apprendere e ottimizzare le proprie prestazioni [14]. L’applicazione coordinata delle tecnologie abilitanti consente di migliorare l’efficienza, ridurre i costi operativi, incrementare la qualità dei prodotti e favorire la personalizzazione dei beni e dei servizi [17] [4].

1.2.1 Panoramica delle tecnologie 4.0

L’Osservatorio Industria 4.0 del Politecnico di Milano [21] definisce le soluzioni di digitalizzazione dei processi di produzione e supply chain:

- Manufacturing Big Data
- Additive Manufacturing (stampa 3D)
- Industrial Internet of Things
- Cloud
- Advanced Automation
- Advanced HMI (Human Machine Interface)

Come illustrato in figura 3, le tecnologie per l'Industria 4.0, specifica l'Osservatorio, si dividono in due grandi insiemi: uno più vicino all'IT, formato da Internet of Things, Big Data e Cloud Computing. L'altro, più eterogeneo e vicino al livello operativo, formato da Advanced Automation, Advanced HMI (Human Machine Interface), e Additive Manufacturing.



Figura 3. Industria 4.0 (fonte EconomyUp)

Secondo il Piano Nazionale Industria 4.0 [4] e le più recenti analisi degli Osservatori Digital Innovation del Politecnico di Milano [25], le principali tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0, come si vede nella figura 4, comprendono un insieme di strumenti digitali in grado di connettere, analizzare e ottimizzare l'intero ecosistema produttivo ed includono:

- Internet of Things (IoT): consente la connessione tra oggetti, macchine e sistemi aziendali attraverso sensori e dispositivi intelligenti, permettendo la raccolta e l'analisi in tempo reale di dati provenienti dai processi produttivi.
- Big Data e Advanced Analytics: permettono di analizzare enormi quantità di dati strutturati e non strutturati per ottenere insight predittivi e ottimizzare le decisioni operative e strategiche.
- Intelligenza Artificiale (AI): fornisce strumenti di apprendimento automatico (machine learning), visione artificiale e automazione cognitiva, applicabili a una vasta gamma di funzioni aziendali.
- Cloud Computing: abilita la scalabilità dei servizi digitali e l'accesso distribuito a risorse informatiche e dati aziendali, con significativi vantaggi in termini di flessibilità e collaborazione.
- Robotica Avanzata e Collaborativa (COBOT): consente l'automazione di compiti ripetitivi e la collaborazione sicura tra uomo e macchina, migliorando ergonomia e produttività.
- Additive Manufacturing (stampa 3D): permette la produzione di componenti personalizzati con tempi e costi ridotti, supportando la logica della produzione just-in-time.
- Realtà Aumentata e Virtuale (AR/VR): facilitano la formazione, il supporto remoto e la progettazione interattiva di processi e prodotti.

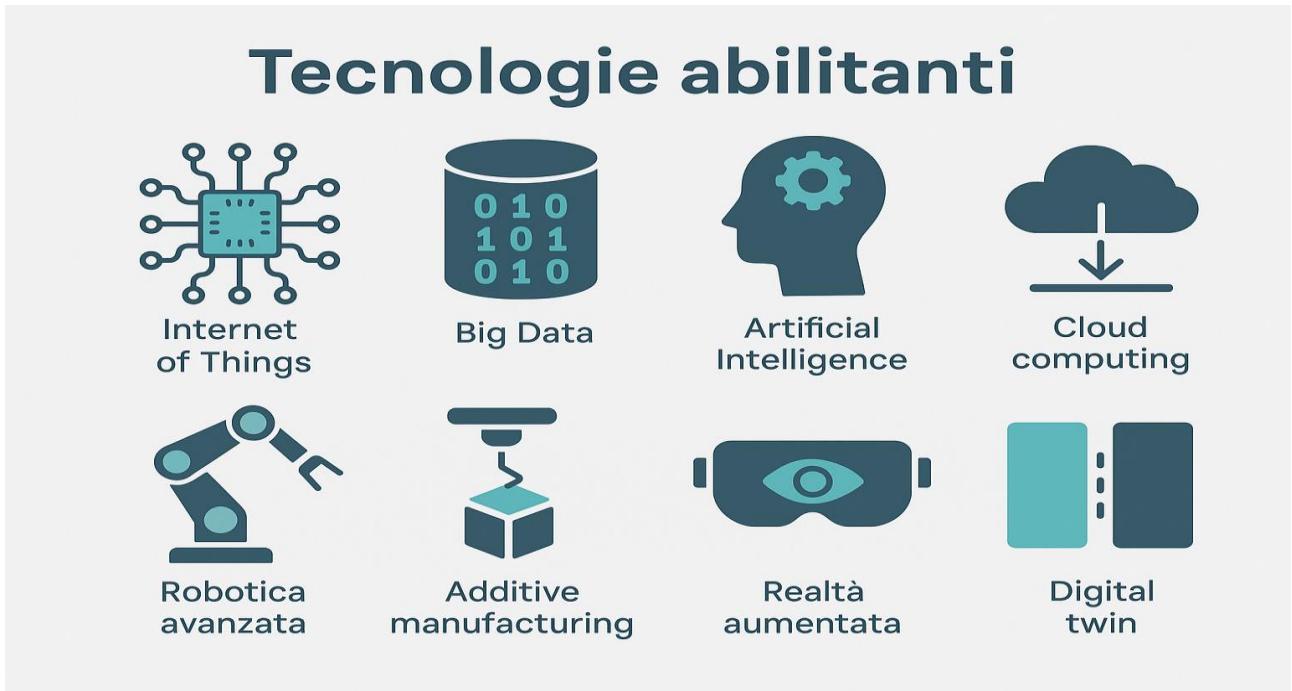


Figura 4. Le principali tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 (rielaborazione da Osservatori Digital Innovation, 2023)

Queste tecnologie costituiscono un sistema abilitante integrato, la cui efficacia non dipende solo dalla componente tecnologica, ma anche dalla capacità dell'impresa di riorganizzare i processi interni e sviluppare le competenze digitali delle risorse umane [8].

1.2.2 Digital Twin, IoT, Big Data, AI, robotica collaborativa

Un ruolo centrale nell'evoluzione dell'Industria 4.0 è svolto dai Digital Twin, modelli digitali dinamici di oggetti, macchine o processi reali che consentono di monitorare, simulare e ottimizzare in tempo reale l'intero ciclo di vita di un asset industriale [14]. Il Digital Twin è alimentato da dati provenienti da sistemi IoT, da sensori intelligenti e da analisi avanzate basate su algoritmi di intelligenza artificiale (AI), fornendo una rappresentazione virtuale fedele e costantemente aggiornata del sistema fisico [26] [17].

Secondo il World Economic Forum (2022) [27], l'adozione di Digital Twin è destinata a crescere esponenzialmente nei prossimi anni, soprattutto in ambiti come la manutenzione predittiva, il controllo qualità e la logistica intelligente dove la convergenza tra IoT, Big Data e AI sta trasformando la gestione industriale in ottica predittiva e data-driven. L'integrazione tra Digital Twin e altre tecnologie – in particolare Big Data e AI – consente non solo di raccogliere dati, ma anche di trasformarli in modelli predittivi e prescrittivi, aumentando la capacità decisionale delle imprese [14] [6].

Parallelamente, la robotica collaborativa sta diventando uno standard produttivo nelle smart factory: i cobot lavorano fianco a fianco con gli operatori umani, con elevati standard di sicurezza, flessibilità operativa e capacità di apprendimento. In combinazione con visione artificiale e AI, i cobot sono in grado di adattarsi in tempo reale a situazioni mutevoli, favorendo produzioni personalizzate e piccole serie ad alto valore aggiunto [25] [27].

1.2.3 Impatto sulle fabbriche e sulla supply chain

L'introduzione delle tecnologie 4.0 sta generando un impatto profondo sull'organizzazione delle fabbriche, trasformandole in smart factory, ovvero ambienti produttivi digitalizzati, flessibili e adattivi. In questi contesti, ogni fase del ciclo produttivo è monitorata e in tempo reale e interconnessa, dalla progettazione al post-vendita [1] [14]. In queste fabbriche, i sistemi IoT, AI e di analisi predittiva consentono un controllo

continuo delle performance produttive, abilitando manutenzione predittiva, riduzione dei fermi macchina e ottimizzazione dei flussi energetici e logistici [17] [6].

Il concetto di supply chain 4.0 si riferisce a una catena del valore interamente digitalizzata, in cui fornitori, clienti e reparti aziendali scambiano dati in tempo reale, aumentando la trasparenza, la reattività e la resilienza [28] [25]. L'integrazione di IoT, AI e Analisi Predittiva consente alle imprese di anticipare le interruzioni, ottimizzare i flussi logistici e gestire in modo dinamico domanda e offerta, migliorando l'efficienza complessiva della catena del valore [29] [8].

Secondo McKinsey (2021) [29], le aziende che hanno investito nelle tecnologie 4.0 hanno ottenuto incrementi medi del 15-20% in efficienza operativa, una riduzione dei costi logistici fino al 30%, e una diminuzione degli scarti produttivi del 20%.

In sintesi, le tecnologie abilitanti non rappresentano solo strumenti di automazione, ma leve strategiche per ripensare l'intero modello industriale in chiave *data-driven*, sostenibile e resiliente, ponendo le basi per un ecosistema manifatturiero orientato alla collaborazione e alla sostenibilità [13] [6].

1.3 Politiche e iniziative in Italia

1.3.1 Il Piano Nazionale Industria 4.0

Dopo una serie di annunci e consultazioni con imprese e istituzioni, il 21 settembre 2016 l'allora Presidente del Consiglio Matteo Renzi e il Ministro dello Sviluppo Economico Carlo Calenda presentarono ufficialmente il Piano Nazionale Industria 4.0, all'interno della Legge di Bilancio 2017, approvata definitivamente dal Senato il 7 dicembre 2016 [4]. Come mostrato nella figura 5, il Piano nasceva con l'obiettivo di stimolare investimenti privati aggiuntivi per circa 10 miliardi di euro, mobilitare 11,3 miliardi di spesa privata in ricerca, sviluppo e innovazione con focus sulle tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0, e favorire 2,6 miliardi di euro di investimenti privati early stage nel corso del 2017 [30] [31]. Il provvedimento prevedeva un mix integrato di misure: incentivi fiscali per gli investimenti in beni strumentali, credito d'imposta per ricerca e sviluppo, super e iperammortamento, sostegno al venture capital, potenziamento della banda ultralarga, e iniziative di formazione per la diffusione delle competenze digitali nelle scuole e nelle università con lo scopo ultimo di favorire e incentivare le imprese ad adeguarsi e aderire pienamente alla quarta rivoluzione industriale [4] [32].

Piano nazionale Industria 4.0 2017-2020 Obiettivi



Direttive chiave		Direttive di accompagnamento	
	Investimenti innovativi +10 €MId incremento investimenti privati da 80 a 90 €MId nel 2017		Competenze 200,000 studenti universitari e 3,000 manager specializzati su temi I4.0 +100% studenti iscritti ad Istituti Tecnici Superiori su temi I4.0 ~1.400 dottorati di ricerca con focus su I4.0 (vs. ~5.000 previsti nel PNR) Competence Center nazionali
	Infrastrutture abilitanti 100% delle aziende italiane coperte a 30Mbps entro il 2020 50% delle aziende italiane coperte a 100Mbps entro il 2020		Strumenti pubblici di supporto +0,9 €MId Riforma e rifinanziamento per il 2017 del Fondo Centrale di Garanzia +1 €MId Contratti di sviluppo focalizzati su investimenti I4.0 +0,1 €MId Forte investimento su catene digitali di vendita (Piano Made in Italy) Scambio salario – produttività tramite incremento RAL e limite massimo agevolabile

Figura 5. Piano Nazionale Industria 4.0 (fonte: Cabina di Regia Industria 4.0)

Lo scopo ultimo del Piano era favorire la transizione delle imprese italiane verso modelli produttivi digitalizzati, capaci di sfruttare le opportunità offerte dalla quarta rivoluzione industriale, aumentando competitività, produttività e innovazione [33] [34].

Il Piano Nazionale Industria 4.0 ha rappresentato quindi un punto di svolta nella politica industriale italiana, ponendo le basi per i successivi aggiornamenti: Impresa 4.0 (2018–2019), Transizione 4.0 (2020–2023) e Transizione 5.0 (2024-2025) [5] [35].

Al momento del suo debutto, il Piano aveva previsto le seguenti misure (poi in parte modificate dai successivi governi):

1. Iper e Super Ammortamento. L'obiettivo di questo provvedimento è supportare e incentivare gli investimenti delle imprese in beni strumentali nuovi, materiali e immateriali (software e sistemi IT), funzionali alla trasformazione digitale dei processi produttivi. L'iperammortamento prevedeva una maggiorazione del 250% del costo di acquisto dei beni materiali nuovi, dispositivi e tecnologie abilitanti la trasformazione in chiave 4.0. Il superammortamento, invece, consentiva una maggiorazione del 140% sugli investimenti in beni strumentali nuovi, materiali o in leasing. Le imprese che beneficiavano dell'iperammortamento potevano inoltre usufruire dell'agevolazione anche per investimenti in beni immateriali connessi, come software e piattaforme digitali [4] [36].

2. Nuova Sabatini. Introdotta con la Legge n. 147/2013 e rifinanziata nell'ambito del Piano Industria 4.0, la misura mira a sostenere le imprese che richiedono finanziamenti per l'acquisto di beni strumentali, macchinari, impianti e tecnologie digitali (hardware e software). Garantisce un contributo a parziale copertura degli interessi pagati dall'impresa su finanziamenti bancari di importo compreso tra 20.000 e 2.000.000 di euro, concessi da istituti bancari convenzionati con il MISE, che attingono sia a un apposito plafond di Cassa Depositi e Prestiti, sia alla provvista ordinaria. Il contributo è calcolato sulla base di un piano di ammortamento convenzionale di 5 anni con un tasso d'interesse del 2,75% annuo ed è maggiorato del 30% per investimenti in tecnologie Industria 4.0. Inoltre, la Nuova Sabatini consente l'accesso prioritario al Fondo centrale di Garanzia nella misura massima dell'80% [37] [38].

3. Credito d'imposta Ricerca e Sviluppo (R&S). Introdotto con la Legge di Stabilità 2015 (L. 190/2014) e potenziato nel Piano Industria 4.0, il credito d'imposta R&S intende stimolare la spesa privata in ricerca, sviluppo e innovazione, per innovare processi e prodotti e garantire così la competitività futura delle imprese.

Il beneficio consisteva in un credito d'imposta pari al 50% delle spese incrementali in R&S, fino a un massimo di 20 milioni di euro annui per beneficiario, calcolato sulla media delle spese in Ricerca e Sviluppo negli anni 2012–2014. La misura è applicabile per le spese in Ricerca e Sviluppo che saranno sostenute nel periodo 2017-2020 [4] [39].

4. Patent Box. Il *Patent Box* è un regime opzionale di tassazione agevolata sui redditi derivanti da beni immateriali: brevetti industriali, marchi registrati, disegni e modelli industriali, know how e software protetto da copyright. Introdotto dal Decreto-legge n. 3/2015, l'agevolazione consente una riduzione del 50% dal 2017 in poi della base imponibile IRES e IRAP, sui redditi d'impresa connessi all'uso diretto o indiretto (ovvero in licenza d'uso) di beni immateriali sia nei confronti di controparti terze che di controparti correlate (società infragruppo). Il beneficio è dato a condizione che il contribuente conduca attività di R&S connesse allo sviluppo e al mantenimento dei beni immateriali [40] [41].

5. Startup e PMI innovative. Le startup innovative godono di un regime agevolato in materia di semplificazioni amministrative, accesso al mercato del lavoro, incentivi fiscali e diritto fallimentare. Larga parte di queste misure sono estese anche alle PMI innovative, introdotte con la Legge n. 33/2015, cioè a tutte le piccole e medie imprese che operano nel campo dell'innovazione tecnologica, a prescindere dalla data di costituzione o dall'oggetto sociale [42] [43].

6. Fondo di Garanzia per le PMI. Il Fondo Centrale di Garanzia sostiene le imprese e i professionisti con difficoltà di accesso al credito, offrendo garanzie pubbliche fino all'80% del finanziamento per operazioni a breve che a medio-lungo termine sia per far fronte a esigenze di liquidità che per realizzare investimenti. Ogni impresa o professionista può beneficiare di un importo massimo garantito di 2,5 milioni di euro, utilizzabile anche in più operazioni fino a concorrenza del tetto stabilito. Il limite si riferisce all'importo garantito. Invece per il finanziamento nel suo complesso non è previsto un tetto massimo [44] [42].

1.3.2 Evoluzione verso Transizione 4.0 e Transizione 5.0

A partire dal 2020, il Piano Nazionale Industria 4.0 si è evoluto nel Piano Transizione 4.0, con una rinnovata attenzione alla sostenibilità ambientale, all'innovazione digitale e alla formazione delle competenze [45]. Tale piano rappresenta la nuova politica industriale italiana, nata con l'obiettivo di sostenere la ripresa post-pandemia e promuovere investimenti produttivi, digitali e green, in linea con la strategia europea per la digitalizzazione e il Green Deal [46] [6].

L'evoluzione del paradigma sta ora convergendo verso la Transizione 5.0, concetto che estende i principi della digitalizzazione industriale includendo gli aspetti di efficienza energetica, sostenibilità ambientale e benessere umano, in un'ottica di innovazione responsabile e centrata sull'uomo [47] [48].

Come indicato dal Ministero delle Imprese e del Made in Italy (MIMIT) [49], le principali misure del Piano Transizione 4.0 che mirano a favorire l'adozione di tecnologie digitali, la ricerca e la formazione sono:

- Credito d'imposta per investimenti in beni strumentali, destinato a supportare e incentivare le imprese che investono in beni strumentali nuovi, materiali e immateriali, funzionali alla trasformazione tecnologica e digitale dei processi produttivi [49].
- Credito d'imposta per ricerca, sviluppo, innovazione e design, finalizzato a stimolare la spesa privata in R&S e innovazione tecnologica, sostenendo la transizione digitale, l'economia circolare e la sostenibilità ambientale [49] [50].
- Credito d'imposta Formazione 4.0, volto a promuovere la formazione del personale nelle aree chiave dell'automazione, dell'analisi dei dati, dell'IoT e della cybersecurity, rafforzando le competenze digitali nelle imprese italiane [51] [52].

Il passaggio alla Transizione 5.0, previsto nel contesto del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), introduce una visione più ampia: l'integrazione tra digitale, green ed economia umana, con l'obiettivo di costruire un sistema produttivo sostenibile, resiliente e centrato sulla persona [53] [47].

1.3.3 I Competence Center

Con il Piano Nazionale Industria 4.0, il Governo italiano ha avviato il percorso per la creazione degli otto Competence Center, centri di eccellenza dedicati al trasferimento tecnologico e alla diffusione delle competenze legate alla digitalizzazione dei processi industriali. [54] [55].

Gli otto Competence Center, dislocati in tutto il territorio nazionale (Torino, Milano, Bologna, Genova, Padova, Pisa, Roma e Napoli) sono stati realizzati in partenariato con oltre 400 imprese e più di 50 università e centri di ricerca pubblici e privati [56] [57].

I centri hanno il compito di fornire orientamento, formazione e supporto operativo alle imprese nella definizione e realizzazione di progetti di innovazione, ricerca industriale e sviluppo sperimentale, con l'obiettivo di favorire l'adozione delle tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 come IoT, AI, Big Data, robotica e manifattura additiva e promuovere l'innovazione collaborativa [58] [59].

In particolare, i Competence Center operano come hub di trasferimento tecnologico, promuovendo sinergie tra mondo della ricerca e sistema produttivo, e sostenendo PMI e startup innovative nell'attuazione di progetti pilota e test di applicazioni digitali avanzate [57] [60].

1	Politecnico di Torino	Manufacturing 4.0	Aerospazio, automotive e additive manufacturing
2	Politecnico di Milano	Made in Italy 4.0	Tecnologie per la fabbrica 4.0
3	Alma Mater Studiorum Università di Bologna	BI-REX	Big Data, innovazione e ricerca
4	Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa	ARTES 4.0	Robotica Avanzata, Tecnologie e Sistemi digitali abilitanti
5	Università degli Studi di Padova	SMACT	Agroalimentare, abbigliamento, arredamento e automazione
6	Università degli Studi di Napoli "Federico II"	Industry 4.0	Automotive, aerospazio, agricoltura, farmaceutico
7	Consiglio Nazionale delle Ricerche	START 4.0	Energia, trasporti, idrico, produzione, porto
8	Università degli Studi di Roma "La Sapienza"	Cyber 4.0	Cybersecurity

Tabella 1. I Competence Center in Italia e la loro graduatoria (fonte Competence Center i4.0)

Come si vede nella tabella 1, il capofila di “Manufacturing 4.0” è il Politecnico di Torino, che ha partner industriali come FCA, General Motor, GE Avio, Thales Alenia. Il focus è su aerospazio, automotive e additive manufacturing. “Made in Italy 4.0” è guidato dal Politecnico di Milano e focalizzato sulle tecnologie per la fabbrica 4.0. “BI-Rex”, guidato dall’Università di Bologna, è sostenuto anche dagli atenei di Modena, Reggio Emilia, Parma e Ferrara. “Artes 4.0” fa capo alla Scuola Superiore Sant’Anna di Pisa che riunisce la Scuola Normale Superiore, Università di Pisa, Università di Firenze, Università di Siena e altri atenei. “Smact” è capeggiato dall’Università di Padova ma sostenuto da una rete di atenei del territorio (Verona, Venezia, Iuav, Trento, Bolzano, Udine, Trieste e altri): il focus è su agroalimentare, abbigliamento, arredamento e automazione. “Industry 4.0” è un centro guidato dall’Università “Federico II” di Napoli e sostenuto da otto fra atenei campani e pugliesi, e dalle Regioni Campania e Puglia. “Start 4.0” è capitanato dal Consiglio Nazionale delle Ricerche, insieme a ABB. Leonardo, Ansaldo e altri. Il centro “Cyber 4.0”, guidato dall’Università “La Sapienza” di Roma, ha per focus la cybersecurity [61].

Il Piano Industria 4.0 “ha rappresentato uno shock positivo per la manifattura italiana”, ha scritto Giovanni Miragliotta, co-direttore dell’Osservatorio Industria 4.0 del Politecnico di Milano [62]. Secondo Miragliotta, “le aziende sono tornate ad investire in modo cospicuo dopo anni di quasi immobilità (+9% nel 2017) e a far crescere il valore aggiunto manifatturiero (+2,1% nel biennio 2016–2017). Le aziende dell’offerta, anche grazie al Piano Industria 4.0, hanno visto incrementi del loro mercato dell’ordine del 30%. L’Italia della manifattura digitale ha vissuto, a partire dal settembre 2016, un momento di grande euforia, al punto che intitolammo la Ricerca 2016–2017 del nostro Osservatorio “La grande occasione””[63].

Tali dati, diffusi dal Politecnico di Milano, confermano come il Piano Nazionale Industria 4.0 abbia avuto un impatto tangibile sugli investimenti produttivi e sulla diffusione delle tecnologie digitali nel tessuto manifatturiero italiano [64] [4].

1.3.4 Il ruolo del MADE per connettere PMI e tecnologie 4.0

Nel dicembre 2020, in piena pandemia, è stato inaugurato a Milano il MADE, Competence Center Industria 4.0, uno degli otto centri di competenza nazionali istituiti nell’ambito del Piano Nazionale Industria 4.0 [61] [65]. Il centro è stato costituito grazie alla collaborazione tra 48 partner di cui 43 imprese private, 4 università (Politecnico di Milano, Università degli Studi di Bergamo, Università di Brescia e Università di Pavia) e 1 ente pubblico, con il supporto del Ministero dello Sviluppo Economico e un investimento complessivo di 22 milioni di euro [66] [67].

Il MADE si presenta come una Fabbrica Digitale e Sostenibile, concepita come piattaforma dimostrativa e formativa per supportare le PMI italiane nel percorso di transizione tecnologica e digitale, sotto la presidenza del professor Marco Taisch [66] [68].

Lo spazio è articolato in 20 dimostratori tecnologici, ognuno dedicato a una specifica area di applicazione dell'Industria 4.0: robotica collaborativa, big data, manutenzione predittiva e remota, Digital Twin, efficienza energetica, cybersecurity industriale, lean 4.0, manifattura additiva, intelligenza artificiale, IoT e 5G [69].

Nel luglio 2021, MADE ha annunciato la selezione di 22 progetti di innovazione, ricerca industriale e sviluppo sperimentale, elencati nella tabella 2, ammessi al finanziamento complessivo di 900.000 euro, pari al 75% della dotazione della prima finestra del bando, con una successiva fase competitiva da 300.000 euro per progetti di PMI manifatturiere [70].

	Soggetto proponente/ capofila in caso di partenariato	Titolo del progetto (acronimo)
1	Alumotion S.r.l.	RSAFI-A10
2	Costruzioni Meccaniche Sottoriva S.p.A.	ARCO
3	Tecnoinox S.r.l.	VIR-PRO-DE (VIRtual PROduct DEvelopment)
4	TDK Foil Italy S.p.A.	TDK Foil 4.0
5	Automationware S.r.l.	AWCombo
6	Gaudino S.r.l.	REFrigerATOR 4.0 – step 1
7	Yk-Robotics S.r.l.	HIRA
8	Bluebiloba Startup Innovativa S.r.l.	TOCS
9	Electrolux Italia S.p.A.	SOS-COOKS
10	Elframco S.p.A.	Restyling 4.0
11	Rejoint S.r.l.	RJ-TAG
12	Monzesi S.r.l.	IGSS
13	Permedica S.p.A.	MOMAPRO
14	Ero S.r.l.	ERO-DL
15	Italpresse S.p.A.	INT-PRO2
16	Latteria Soresina S.C.A.	D.P.I.A.RES.
17	Meccanica Del Sarca S.p.A.	AcTor
18	Valmex S.p.A.	Integrazione schedulazione
19	Carel Industries S.p.A.	bCU
20	Latteria Soresina S.C.A.)	MIRS (Metodi Innovativi di Ricerca e Sviluppo
21	Meccanica Del Sarca S.p.A.	WOW
22	Bermec Precision S.r.l.	DIG.BER.

Tabella 2. Soggetti ammessi al finanziamento relativi al bando per la selezione di progetti di innovazione, ricerca industriale e sviluppo sperimentale del 1° marzo 2021 (fonte MADE. Competence Center I4.0)

Il 64% delle candidature ammesse è stato presentato da Pmi provenienti principalmente dal nord e centro Italia: Lombardia (45%), Veneto (14%), Toscana (9%) e Trentino-Alto Adige (9%).

Tra le attività più richieste:

- la progettazione, l'ingegnerizzazione e lo sviluppo prodotto con sistemi di realtà aumentata e virtuale (11%) anche tramite l'utilizzo della "virtual room" presente in Made
- la pianificazione e il controllo in tempo reale della produzione (15%)
- l'intelligenza artificiale e big data analytics (15%) a conferma della tendenza tecnologica che vede un interesse in crescita
- i sistemi digitali di supporto all'operatore (10%)
- gli strumenti digitali a supporto di politiche di manutenzione 4.0 (8%) [71]

Nel settembre 2022, il Dipartimento per lo Sviluppo Economico di Abu Dhabi (ADDED) ha firmato un protocollo d'intesa con MADE – Competence Center 4.0, volto a promuovere lo sviluppo di competenze digitali e la costituzione di un centro di competenza locale negli Emirati Arabi Uniti [72] [73].

1.4 Adozione dell'Industria 4.0 in Italia

1.4.1 Stato dell'adozione: dati e statistiche

Secondo recenti analisi condotte dall'Osservatorio Industria 4.0 del Politecnico di Milano, solo il 14% delle imprese italiane può essere considerato realmente “4.0”, cioè capace di integrare in modo sinergico più tecnologie digitali avanzate lungo la catena del valore [74]. Nonostante ciò, il mercato mostra una crescita costante, trainata dal settore manifatturiero e dal potenziamento degli investimenti in automazione, IoT, analytics e robotica collaborativa [75] [76].

Le aziende italiane sono ancora indietro nel pieno accoglimento dell'Industria 4.0, anche se una buona parte sta avviando i processi o sta facendo progressi in questo campo. L'indagine “EY Digital Manufacturing Maturity Index 2019”, presentata a luglio 2019, mostra come in Italia solo una minima parte delle aziende prese in esame, in tutto il 14%, abbia raggiunto uno stato più avanzato di sviluppo digitale caratterizzato da progettualità 4.0 evolute. Per progettualità evolute si intendono sistemi informativi in grado di scambiare informazioni verticalmente dalle macchine all'ERP (o cloud) e con un buon livello di integrazione delle informazioni lungo tutto il processo produttivo, comprese le altre funzioni aziendali [77].

Il 49% delle aziende italiane, invece, si trova in una fase intermedia, in cui sta ponendo le basi per una gestione digitale dei processi, mentre circa un terzo (37%) è ancora in una fase sperimentale o pilota, con iniziative limitate all'integrazione interna dei dati. Solo una quota marginale (5%) delle imprese dispone di sistemi strutturati e automatizzati di scambio dati con fornitori o clienti, indicando una scarsa diffusione dell'integrazione digitale estesa [77] [78].

Il divario dimensionale rimane evidente: il 70% delle grandi imprese ha già implementato tecnologie di Industria 4.0 e piani di sviluppo digitale strutturati, mentre le PMI risultano più lente nell'adozione, ostacolate da barriere culturali, carenza di competenze e difficoltà di accesso agli incentivi pubblici [79] [74].

Inoltre, solo una piccola parte delle imprese manifatturiere ha intrapreso operazioni societarie o collaborazioni strategiche orientate alla trasformazione digitale, confermando che la piena transizione verso modelli produttivi 4.0 è ancora in corso [80] [81].

1.4.2 Casi aziendali: FCA, Pirelli, Luxottica

Come osserva Luciano Pero, docente di *Theory and Design of Organizational Models* al Politecnico di Milano, “la via alta all'innovazione, non solo non è una mitologia, ma trova ampio e concreto riscontro nelle imprese più dinamiche e innovative, che hanno usato le difficoltà generate dalle grandi crisi per imboccare con decisione la strada di una lean evoluta, adattandola alle proprie strategie di business e cavalcandone gli acceleratori digitali” [82].

Ne sono testimonianza alcune grandi imprese italiane che hanno saputo integrare i principi della lean production con le tecnologie digitali dell'Industria 4.0, sviluppando modelli produttivi unici nel panorama internazionale.

Il World Class Manufacturing (WCM), introdotto dal gruppo FCA (oggi Stellantis) a partire dal 2006, rappresenta un sistema integrato di gestione della produzione e del miglioramento continuo, fondato su standard operativi, eliminazione degli sprechi e coinvolgimento attivo dei lavoratori [83] [84]. Il modello, applicato negli stabilimenti di tutto il mondo, è riconosciuto come una delle migliori pratiche di manufacturing excellence [85].

Allo stesso modo, il Pirelli Production System (PPS) integra i principi lean con strumenti digitali di monitoraggio in tempo reale, automazione intelligente e manutenzione predittiva, in linea con i paradigmi dell’Industria 4.0. Il PPS si fonda su processi standardizzati, riduzione delle variabilità produttive e valorizzazione del capitale umano [86].

Infine, il Lean Luxottica System applica una filosofia di miglioramento continuo e di integrazione digitale verticale e orizzontale nelle operations, con un approccio *data-driven* e centrato sull’ergonomia e la qualità [87].

Questi tre modelli dimostrano che la “via alta” all’innovazione si concretizza nella capacità di coniugare lean thinking e tecnologie digitali, promuovendo una cultura partecipativa che coinvolge dipendenti, fornitori e stakeholder nella trasformazione verso l’Industria 4.0 [88].

1.4.3 Opportunità e criticità per le PMI italiane

Le piccole e medie imprese italiane (PMI) mostrano un crescente interesse verso le tecnologie dell’Industria 4.0, riconoscendone il potenziale in termini di competitività, efficienza e sostenibilità [89]. Tuttavia, la loro adozione dei paradigmi digitali è ancora ostacolata da criticità strutturali e organizzative.

Tra le principali barriere emergono la limitata disponibilità di risorse finanziarie, la carenza di competenze digitali e una diffusa resistenza culturale al cambiamento [78] [90]. Questi fattori riducono la capacità delle PMI di pianificare e implementare progetti complessi di digitalizzazione, soprattutto nei comparti manifatturieri e nei distretti produttivi tradizionali [80].

Nonostante tali difficoltà, il potenziale di crescita e innovazione resta elevato: le PMI che hanno avviato percorsi di trasformazione digitale registrano miglioramenti nella produttività e nella qualità dei prodotti, oltre a maggiore resilienza e flessibilità operativa [91] [92].

In questo contesto, il ruolo delle politiche pubbliche e degli strumenti di supporto, come il Piano Transizione 4.0, i Competence Center e i Digital Innovation Hub, risulta determinante per favorire l’accesso agli incentivi, alla formazione e alle reti di innovazione [93] [89].

Pertanto, la costruzione di un ecosistema favorevole, basato su collaborazione, competenze e investimenti mirati, rappresenta una condizione imprescindibile per accompagnare le PMI italiane nella piena transizione verso modelli di impresa 4.0 e 5.0 [94] [81].

1.5 Confronto internazionale

1.5.1 Europa

La Germania è ampiamente riconosciuta come precursore e principale promotore dell’Industria 4.0 in Europa, grazie al programma “Industrie 4.0”, lanciato nel 2011 dal governo federale nell’ambito della *High-Tech Strategy* per potenziare la competitività industriale e l’integrazione tra sistemi fisici e digitali [1] [2].

La Francia, con l’iniziativa “Industrie du Futur” avviata nel 2015, ha definito un quadro di misure di sostegno alle imprese, focalizzato su digitalizzazione, automazione, formazione e sostenibilità, attraverso la collaborazione tra Alliance Industrie du Futur (AIF), ministeri competenti e poli accademici [94].

La Gran Bretagna, pur avendo sviluppato programmi come la UK Industrial Strategy e il Made Smarter Programme, mostra ancora ritardi strutturali nell’adozione su larga scala delle tecnologie 4.0 rispetto ai principali Paesi dell’Europa continentale, in particolare per la mancanza di coordinamento tra politiche industriali e ricerca applicata [95].

In tutti i casi, emergono alcuni fattori comuni di successo quali un forte supporto istituzionale alle imprese e alle PMI, la collaborazione tra università, centri di ricerca e industria e la creazione di ecosistemi nazionali dell'innovazione, in grado di favorire la diffusione di competenze e la competitività tecnologica a livello europeo [96] [97].

1.5.2 Stati Uniti

Come mostrato nella tabella 3, negli Stati Uniti l'approccio alla trasformazione digitale industriale presenta caratteristiche differenti rispetto a quello europeo, pur perseguitando obiettivi simili: aumentare la produttività, ridurre i costi operativi e potenziare la competitività del manifatturiero nazionale.

Le strategie statunitensi si concentrano su un modello decentrato e orientato al mercato, nel quale il governo federale svolge un ruolo di abilitatore attraverso programmi di ricerca e innovazione pubblico-privata come il *Manufacturing USA Network* e il *Advanced Manufacturing Partnership (AMP)*, lanciati per promuovere l'adozione di tecnologie avanzate e la formazione di competenze digitali [98] [99].

Le principali aree di intervento includono automazione avanzata, Internet of Things industriale (IIoT), intelligenza artificiale applicata alla produzione e cybersecurity industriale, con l'obiettivo di favorire la resilienza e la sostenibilità delle catene di fornitura [100] [101].

In sintesi, l'approccio statunitense all'Industria 4.0 si distingue per la collaborazione pubblico-privata, la flessibilità normativa e l'enfasi sull'innovazione tecnologica applicata ai processi produttivi, piuttosto che su un quadro politico centralizzato come quello europeo [102] [81].

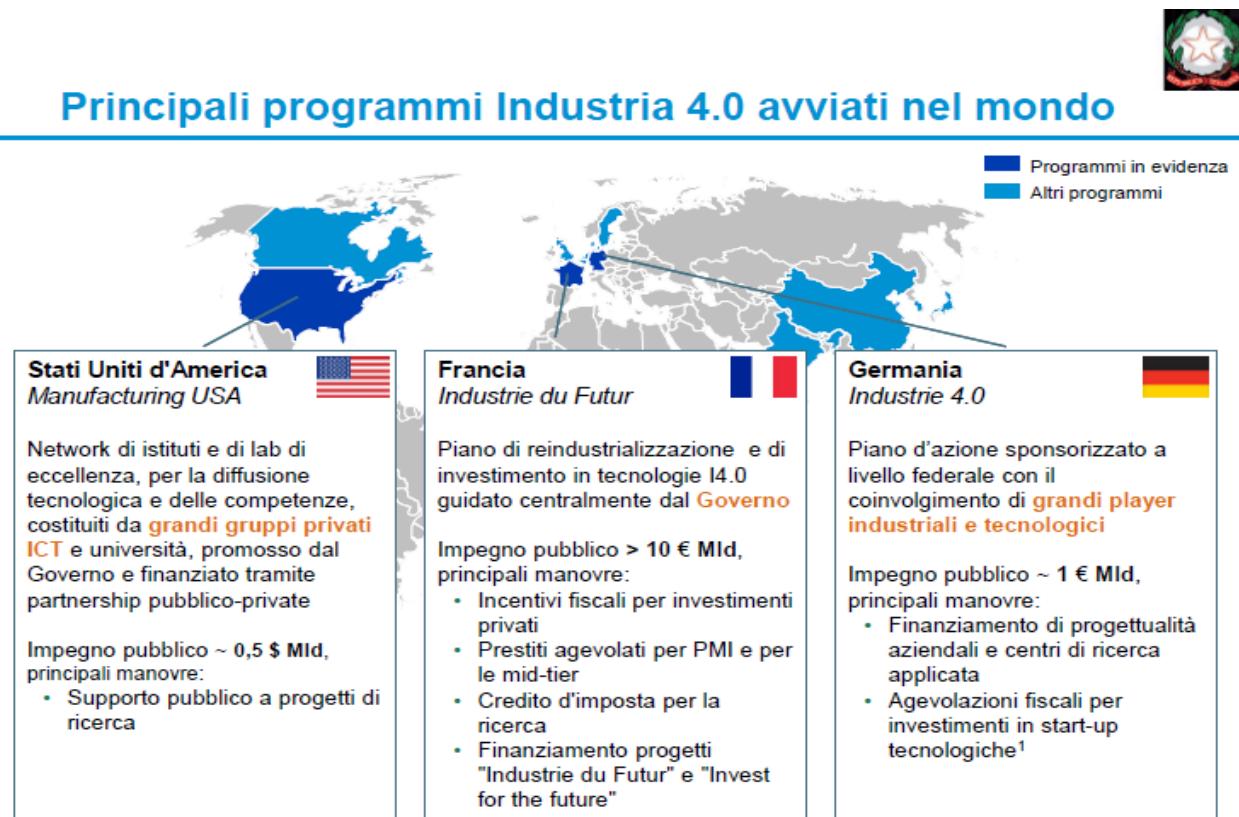


Tabella 3. Programmi industria 4.0 nel mondo (fonte MISE Piano Nazionale Industria 4.0)

1.5.3 Posizionamento dell'Italia

Nonostante le stime non confortanti di Ernst & Young Advisory [77] sulla maturità digitale delle imprese italiane, il mercato dell'Industria 4.0 in Italia nel 2019, ovvero nell'era pre-Covid-19, ha raggiunto un valore complessivo di 3,9 miliardi di euro, segnando una crescita del 22% rispetto al 2018.

Come evidenzia la School of Management del Politecnico di Milano, il settore è quasi triplicato in quattro anni, trainato da investimenti in Industrial IoT, Analytics e Cloud Manufacturing, che rappresentano la quota maggiore del mercato 4.0 [103].

Nello specifico, la composizione del mercato risulta così distribuita:

- 2,3 miliardi di euro (60%) dedicati a progetti di connettività e acquisizione dati (Industrial IoT);
- 630 milioni in Analytics;
- 325 milioni in Cloud Manufacturing;
- 190 milioni in Advanced Automation;
- 85 milioni in Additive Manufacturing;
- e 55 milioni in tecnologie di interfaccia uomo-macchina avanzate (Advanced HMI).

A tali importi si aggiungono 255 milioni di euro per attività di consulenza e formazione legate a progetti Industria 4.0, con un incremento del 17% rispetto all'anno precedente [103] [104].

Secondo l'Osservatorio Industria 4.0, come si vede in figura 6, nel 2019 il 40% delle imprese italiane ha incrementato gli investimenti rispetto al 2018, con una media di 4,5 applicazioni 4.0 per azienda, in particolare nelle aree Cloud, Industrial Analytics e Industrial IoT per la fabbrica connessa [103].

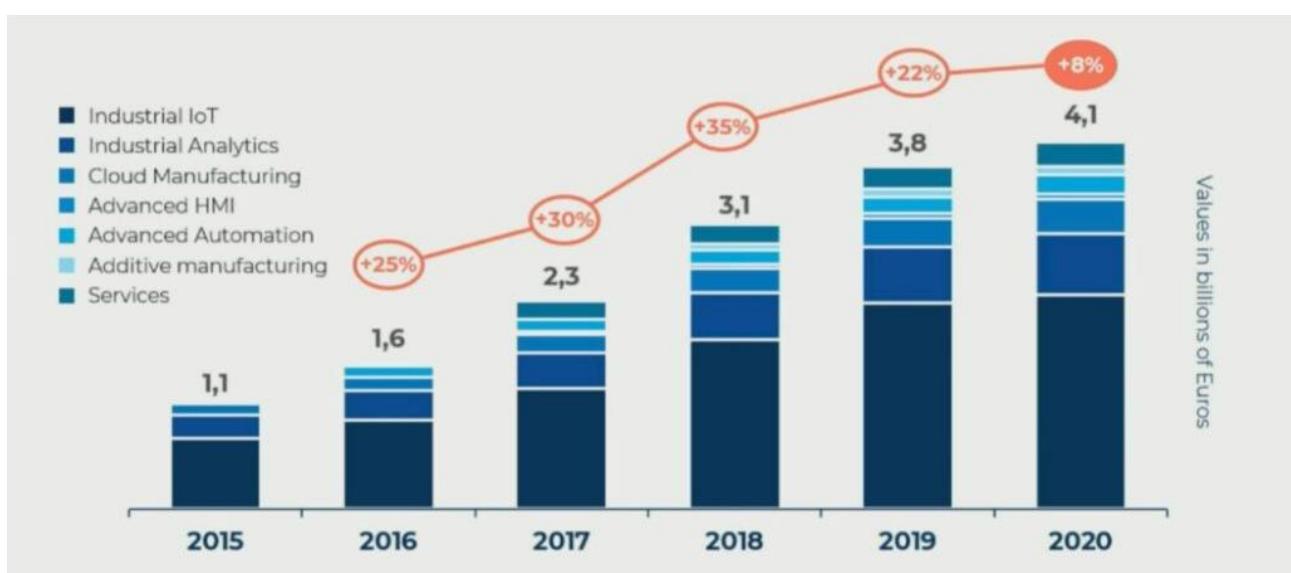


Figura 6. Il valore del mercato 4.0 in Italia (fonte Osservatorio Industria 4.0)

Nonostante i tempi di ritorno degli investimenti possano risultare lunghi, solo l'1% delle imprese si è dichiarato deluso dalle tecnologie 4.0. Inoltre, a seguito dell'emergenza pandemica, quasi un terzo delle aziende ha riconvertito o valutato di riconvertire la produzione (12% e 19% rispettivamente), e per il 25% di esse le tecnologie IoT e Cloud si sono rivelate fondamentali per la continuità operativa [77] [78].

2. DIGITAL TWIN

2.1 Definizione e funzionamento del modello Digital Twin

Il Digital Twin, o gemello digitale, è una rappresentazione virtuale di un oggetto fisico, processo, sistema o infrastruttura, costruita per riflettere in tempo reale lo stato, il comportamento e le prestazioni del suo corrispettivo reale [106].

Si tratta di un modello dinamico, alimentato da dati raccolti attraverso sensori e dispositivi IoT (*Internet of Things*), che consente di simulare, monitorare, analizzare e ottimizzare i processi e le attività lungo l'intero ciclo di vita di un prodotto o di un impianto [106] [107].

Questa tecnologia si basa sull'integrazione tra modellazione fisica o digitale (2D o 3D), *machine learning*, intelligenza artificiale e strumenti di simulazione, per riprodurre fedelmente il funzionamento di un sistema reale. [108]

Il gemello digitale può rappresentare asset materiali e immateriali, incluse persone, macchine, ambienti, infrastrutture e processi, ed è quindi utilizzato in ambiti quali la produzione, la logistica, l'ingegneria, la manutenzione predittiva e la gestione operativa [109].

Il termine “Digital Twin” fu introdotto per la prima volta da Michael Grieves nei primi anni 2000 (2002–2003) durante un corso sul *Product Lifecycle Management* (PLM) presso l’Università del Michigan. [110] In quella sede, Grieves descrisse il gemello digitale come l’equivalente virtuale di un prodotto fisico, evidenziando tre elementi fondamentali: il prodotto fisico, il suo corrispettivo virtuale e i dati che li collegano [111].

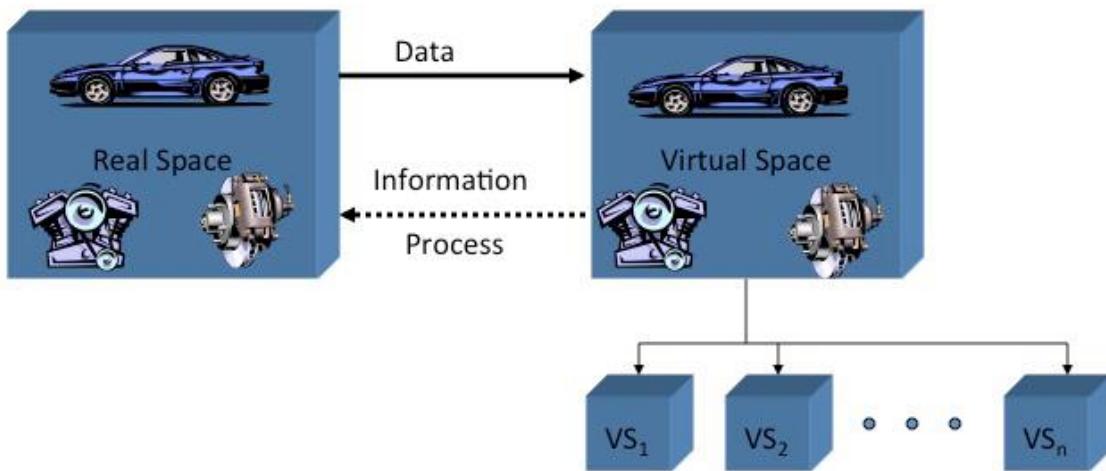


Figura 7. Conceptual Ideal for PLM (Fonte M. Grieves e J. Vickers, Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems)

Tuttavia, come si può osservare dalla figura 7, in questa versione iniziale non era ancora definita l’interazione dinamica tra le due entità né le tecnologie necessarie a implementarla [110] [111].

Ben prima della formalizzazione teorica del concetto, un esempio pionieristico di Digital Twin si può far risalire alla missione Apollo 13 (portare l’uomo sulla luna) della NASA (National Aeronautics and Space Administration) nel 1970. A 56 ore dal decollo un’improvvisa esplosione compromise 2 delle 3 celle a combustibile impedendo la continuazione della missione. La squadra di ingegneri a terra utilizzò una replica digitale del modulo per simulare, testare e validare le soluzioni tecniche necessarie a riportare gli astronauti sani e salvi sulla Terra [112] [113]. Questo episodio viene spesso citato come la prima applicazione pratica

di un gemello digitale, sebbene allora non esistesse ancora una formalizzazione concettuale della tecnologia [112] [114].

Oggi, il Digital Twin è considerato una delle tecnologie chiave dell'Industria 4.0, poiché permette non solo la visualizzazione e simulazione del comportamento di un asset, ma anche l'interazione continua con il suo ambiente operativo, favorendo processi decisionali basati sui dati (*data-driven*), il miglioramento continuo e la resilienza operativa [115].

Come si può vedere nella tabella 4, le definizioni del Digital Twin si sono evolute nel tempo, adattandosi ai progressi tecnologici e alle esigenze applicative. Di seguito una panoramica cronologica allineata ai riferimenti originali:

- 2012 – NASA

"Comprehensive multi-physical, multi-scale, probabilistic simulation system for vehicles or systems. It uses the best physical model to describe the historical use of equipment to reflect the life of its corresponding physical equipment [116].

"Sistema di simulazione completo, multi-fisico, multi-scala e probabilistico per veicoli o sistemi. Usa i migliori modelli fisici per descrivere l'uso storico dell'equipaggiamento, riflettendo la vita del corrispettivo asset fisico."

Introduce il concetto di replica ultra-fedele, basata su dati storici e aggiornamenti real-time tramite sensori

- 2017 – Defense Procurement University

"The integrated multiphysics, multiscale, probability simulation, using the best available models, sensor information, and input data to mirror and predict the life/activity/performance of the corresponding physical Twin, enabled by Digital Thread" [117].

Definizione molto simile a quella NASA, con l'aggiunta del concetto di Digital Thread, una traccia continua dei dati lungo l'intero ciclo di vita del gemello digitale.

- 2019 – Stark Damerau

"Digital representation that contains the feature description of its selected object or its product and service system, and obtains the attributes, conditions and behaviors of the object through models, information and data in a single or even multiple life cycle stages" [118].

"Rappresentazione digitale che include le caratteristiche del suo oggetto selezionato o del suo sistema di prodotto e servizio, ottenendo attributi, condizioni e comportamenti tramite modelli, informazioni e dati, in uno o più stadi del ciclo di vita."

Enfatizza l'ampio spettro del ciclo di vita, non limitato alla sola fase operativa.

- 2020 – China Institute of Electronic Technology Standardization

"DT refers to making full use of data such as physical model, sensor update, operation history, and integrating multi-disciplinary, multi-physical, multi-scale, and multi-probability simulation process to complete the mapping in the virtual space, thereby reflecting the full life cycle process" [119].

"Il DT utilizza appieno dati quali modello fisico, aggiornamenti sensore e storico operativo, integrando un processo di simulazione multidisciplinare, multi-fisico, multi-scala e multi-probablistico per completare la mappatura nello spazio virtuale, riflettendo l'intero ciclo di vita."

Enfasi sulla completezza del ciclo di vita e l'approccio multidisciplinare.

- 2020 – Digital Twin Consortium (DTC)

“A digital twin is a virtual representation of real-world entities and processes, synchronized at a specified frequency and fidelity. Digital Twin systems transform business by accelerating holistic understanding, optimal decision-making, and effective action. Digital twins use real-time and historical data to represent the past and present and simulate predicted futures.... motivated by outcomes, tailored to use cases, powered by integration, built on data, guided by domain knowledge, and implemented in IT/OT systems” [120].

“Un gemello digitale è una rappresentazione virtuale di entità e processi del mondo reale, sincronizzati con una frequenza e una fedeltà specifiche. I sistemi di gemelli digitali trasformano il business accelerando la comprensione olistica, il processo decisionale ottimale e l'azione efficace. I gemelli digitali utilizzano dati storici e in tempo reale per rappresentare il passato e il presente e simulare scenari futuri previsti... motivati dai risultati, adattati ai casi d'uso, alimentati dall'integrazione, basati sui dati, guidati dalla conoscenza del dominio e implementati nei sistemi IT/OT”

Le definizioni più recenti aggiungono nuovi concetti fondamentali. Il Digital Thread (2017) come integrazione e tracciamento continuo dei dati. L'allineamento a KPI (2020) che permette di passare dal modello puramente tecnico all'approccio orientato ai risultati aziendali. Infine, la fedeltà e frequenza della sincronizzazione digitale tra reale e virtuale (2020).

Dal punto di vista accademico, emerge un progresso dal livello tecnico-fisico a un approccio integrato aziendale, dove i Digital Twin diventano strumenti strategici, basati su dati, dominio, e integrazione tecnica.

Per una definizione più completa e recentissima, la National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM) (2024) lo descrive come:

“A digital twin is a set of virtual information constructs that mimics the structure, context, and behavior of a unique physical entity across its life cycle. These constructs are dynamically updated with data to represent the current condition, historical performance, and predicted future of the physical twin. A digital twin has predictive capabilities, enables decision-making, allows for bidirectional interactions, and is integrated within a larger system-of-systems to support its central mission” [121].

“Un gemello digitale è un insieme di costrutti informativi virtuali che imitano la struttura, il contesto e il comportamento di un'entità fisica unica durante il suo ciclo di vita. Questi costrutti vengono aggiornati dinamicamente con dati per rappresentare le condizioni attuali, le prestazioni storiche e il futuro previsto del gemello fisico. Un gemello digitale ha capacità predittive, consente il processo decisionale, consente interazioni bidirezionali ed è integrato in un sistema di sistemi più ampio per supportare la sua missione centrale.”

Questa definizione rappresenta l'evoluzione più completa e sistemica del concetto di Digital Twin. A differenza delle definizioni precedenti, questa proposta integra dinamicamente i dati. Non si limita a descrivere una replica statica o predittiva, ma enfatizza l'aggiornamento continuo (real-time + storico) per monitorare, analizzare e anticipare gli stati del gemello fisico.

Abbraccia il concetto di “ciclo di vita” completo, dall’ideazione alla dismissione, supportando un’ottica di gestione continua e sostenibile.

Incluse capacità predittive e decisionali. Oltre alla replica e alla simulazione, il Digital Twin diventa uno strumento decisionale operativo, integrato nei flussi gestionali e nei sistemi di controllo aziendali.

Prevede un’interazione bidirezionale. Il Digital Twin può sia leggere dallo spazio fisico che influenzarne le dinamiche (controllo attivo).

Infine, è parte di un “sistema di sistemi”. Riconosce che i DT operano in ambienti complessi (es. smart city, fabbriche connesse), in cui la collaborazione fra Digital Twin è fondamentale.

Questa visione si differenzia da quelle più tecniche del periodo 2012–2019 (NASA, Defense, Stark), che erano focalizzate su modelli e simulazioni ad alta fedeltà, ma con scarso riferimento a decisioni aziendali, ecosistemi digitali o interazione tra domini. La definizione del DTC (2020) già anticipava alcuni elementi decisionali e legati al business, ma quella del NASEM (2024) li unifica in una cornice coerente e strutturata, integrando anche concetti di sistema complesso e sostenibilità digitale.

Fonte / Anno	Aspetto chiave	Ciclo di vita	Predizione	Decision-making	Interazione bidirezionale	Sistema integrato
NASA (2012)	Simulazione probabilistica ad alta fedeltà	✓ solo uso/stato	✓	✗	✗	✗
Defense Univ. (2017)	Introduzione del digital thread	✓ esteso	✓	✗	✗	✗
Stark Damerau (2019)	Modelli multipli e gestione feature	✓	✓ parziale	✗	✗	✗
China IETS (2020)	Simulazione multidisciplinare full-life cycle	✓ completo	✓	✗	✗	✓ (iniziale)
DTC (2020)	Integrazione IT/OT, uso real-time, obiettivi	✓ completo	✓	✓	✓ iniziale	✓
NASEM (2024)	Rappresentazione dinamica, decisionale e sistemica	✓ completo	✓	✓	✓	✓

Tabella 4. Comparazione cronologica definizioni DT

2.2 Architettura e funzionamento

Per comprendere appieno il significato di *Digital Twin* è utile distinguere questo concetto da quelli di *Digital Model* e *Digital Shadow*, tre configurazioni di rappresentazioni digitali che si differenziano in base al grado di integrazione e interscambio di dati tra oggetto fisico e oggetto virtuale [122] [123]. In dettaglio, come si vede in figura 8, nel Digital Model non esiste uno scambio automatico di informazioni tra le due entità. Le modifiche apportate all'oggetto fisico non vengono recepite automaticamente da quello virtuale e viceversa [111] [122].

Nel Digital Shadow, invece, un cambiamento nello stato dell'oggetto fisico genera automaticamente una variazione corrispondente nell'oggetto digitale, ma non il contrario. Il flusso dei dati automatico è dunque unidirezionale, dal fisico al digitale [122] [17].

Nel Digital Twin, infine, i flussi di dati sono bidirezionali e automatizzati: ogni modifica del gemello fisico si riflette istantaneamente sul gemello digitale e viceversa [122] [123] [124].

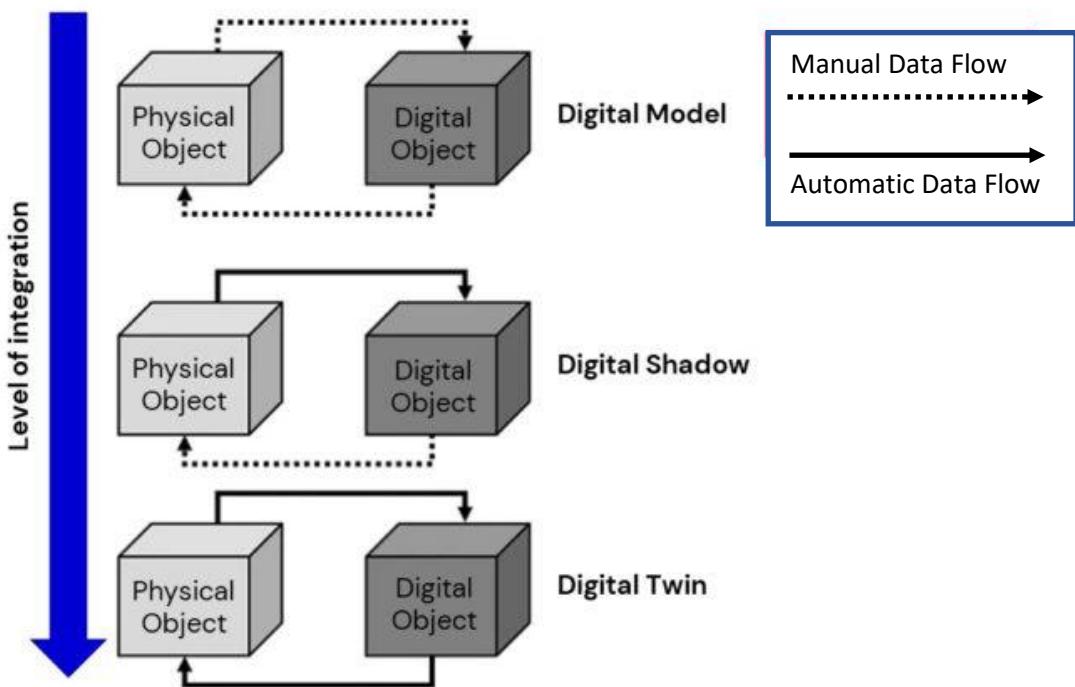


Figura 8. Differenze tra Digital Model, Digital Shadow e Digital Twin

Pensare al Digital Twin come a un semplice modello tridimensionale non è quindi sufficiente [125]. Esso integra un insieme più complesso di dati, comprendendo sia quelli storici di funzionamento dell'oggetto reale, sia quelli derivati dal monitoraggio in tempo reale e dal contesto sistematico in cui esso opera [124] [126].

Un Digital Twin può quindi incorporare informazioni provenienti da sistemi, prodotti o ambienti correlati, creando così una rappresentazione estesa che supporta analisi predittive e simulazioni "what if" grazie all'integrazione con algoritmi di Intelligenza Artificiale e Machine Learning [126] [127].

Ad esempio, un'azienda può realizzare un gemello digitale di un cliente reale, aggregando dati provenienti da diverse fonti come comportamenti d'acquisto, interazioni con il servizio clienti e informazioni demografiche, per simulare scenari complessi e migliorare la personalizzazione dei servizi [127] [128].

2.3 Tecnologie abilitanti

I tre aspetti principali dei Digital Twin sono l'acquisizione, la modellazione e l'applicazione dei dati [129].

Come si vede in figura 9, il Digital Twin utilizza quattro tecnologie per raccogliere e archiviare dati in tempo reale e ottenere informazioni utili per creare una rappresentazione digitale di un oggetto fisico. Queste tecnologie includono l'Internet of Things (IoT), l'Intelligenza Artificiale (IA), la Realtà Estesa (XR) e il Cloud.

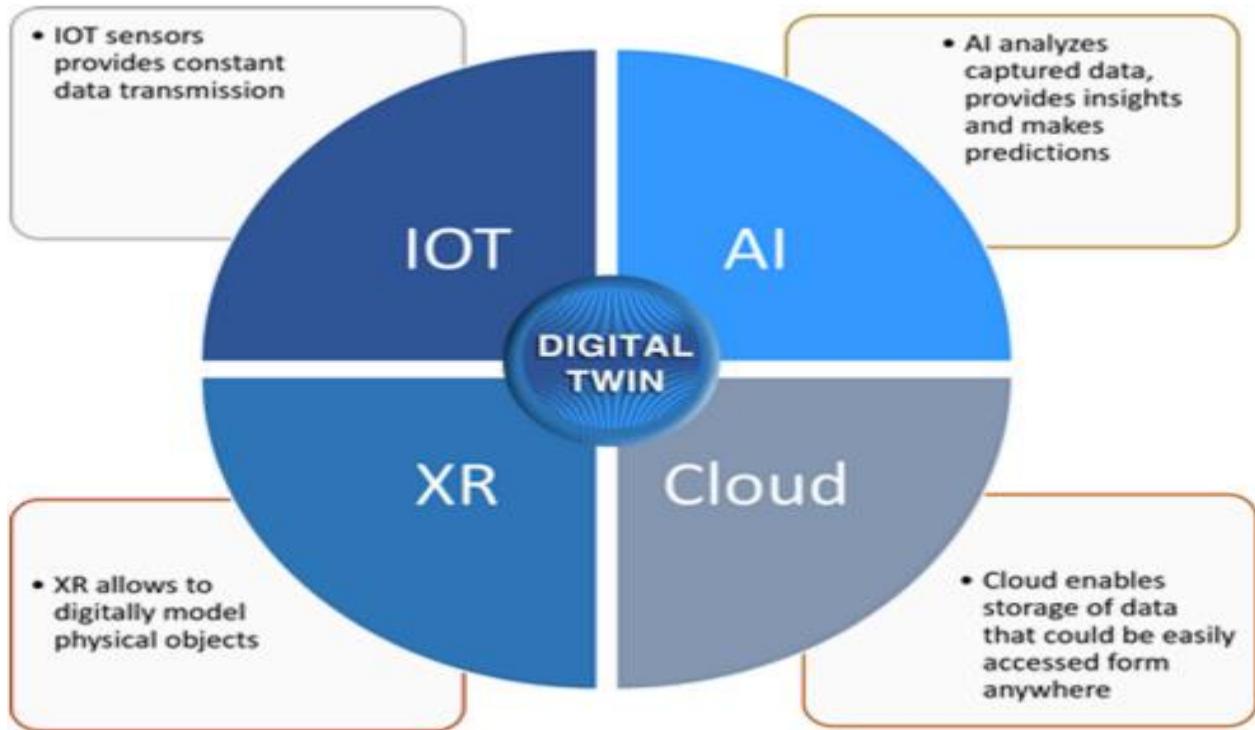


Figura 9. Tecnologie abilitanti per i Digital Twin (Fonte: [181])

Esaminiamole nel dettaglio.

L'Internet of Things (IoT) si riferisce a una gigantesca rete di "cose" connesse. La connessione avviene tra cose e cose, persone e cose o persone e persone [130]. I Digital Twin utilizzano l'IoT come tecnologia principale in ogni applicazione. Entro il 2027, oltre il 90% di tutte le piattaforme IoT sarà in grado di supportare il Digital Twin [131]. L'IoT utilizza sensori per raccogliere dati da oggetti del mondo reale. I dati trasmessi dall'IoT vengono utilizzati per creare una duplicazione digitale di un oggetto fisico. La versione digitale può quindi essere analizzata, manipolata e ottimizzata. L'IoT aggiorna costantemente i dati e aiuta le applicazioni Digital Twin a creare una rappresentazione virtuale in tempo reale di un oggetto fisico. Pertanto, ogni applicazione Digital Twin utilizza l'IoT come tecnologia primaria.

Il Cloud Computing si riferisce alla fornitura di servizi ospitati su Internet. La tecnologia archivia e accede in modo efficiente ai dati tramite Internet [130]. Il cloud computing fornisce ai gemelli digitali la tecnologia di elaborazione dei dati e la tecnologia di archiviazione dei dati nel cloud. Il cloud computing consente ai gemelli digitali, con grandi volumi di dati, di archiviare i dati nel cloud virtuale e di accedere facilmente alle informazioni richieste da qualsiasi luogo. Il cloud computing consente ai gemelli digitali di ridurre efficacemente i tempi di calcolo dei sistemi complessi e di superare le difficoltà di archiviazione di grandi quantità di dati [132].

L'Intelligenza Artificiale (IA) come disciplina dell'informatica. L'IA cerca di imitare le basi dell'intelligenza per creare una nuova macchina intelligente in grado di rispondere come l'intelligenza umana. Le aree di studio dell'IA includono la robotica, il riconoscimento delle immagini e il riconoscimento del linguaggio. Con l'adozione di reti neurali, apprendimento automatico, apprendimento profondo e sistemi esperti [133], l'IA

può assistere i gemelli digitali fornendo uno strumento analitico avanzato in grado di analizzare automaticamente i dati ottenuti e fornire informazioni preziose, fare previsioni sui risultati e dare suggerimenti su come evitare potenziali problemi [24].

La Realtà Estesa (XR) è un termine generico utilizzato per descrivere tecnologie immersive come la Realtà Virtuale (VR), la Realtà Aumentata (AR) e la Realtà Mista (MR). Queste tecnologie possono fondere il mondo fisico e quello virtuale ed estendere la realtà che sperimentiamo [134]. La XR crea rappresentazioni digitali di oggetti in cui oggetti digitali e del mondo reale coesistono e interagiscono in tempo reale. I gemelli digitali utilizzano le funzionalità della XR per modellare digitalmente oggetti fisici, consentendo agli utenti di interagire con i contenuti digitali.

2.4 Applicazioni industriali dei Digital Twin

I Digital Twin rappresentano una tecnologia altamente versatile, con applicazioni che spaziano tra numerosi settori produttivi e di servizi come si vede in figura 10. La capacità di replicare digitalmente un sistema reale consente infatti alle imprese di ottimizzare i processi, anticipare guasti, migliorare la qualità e prendere decisioni più consapevoli basate su dati in tempo reale. Di seguito vengono analizzati i principali ambiti applicativi, con esempi e benefici specifici di alcune aziende italiane.

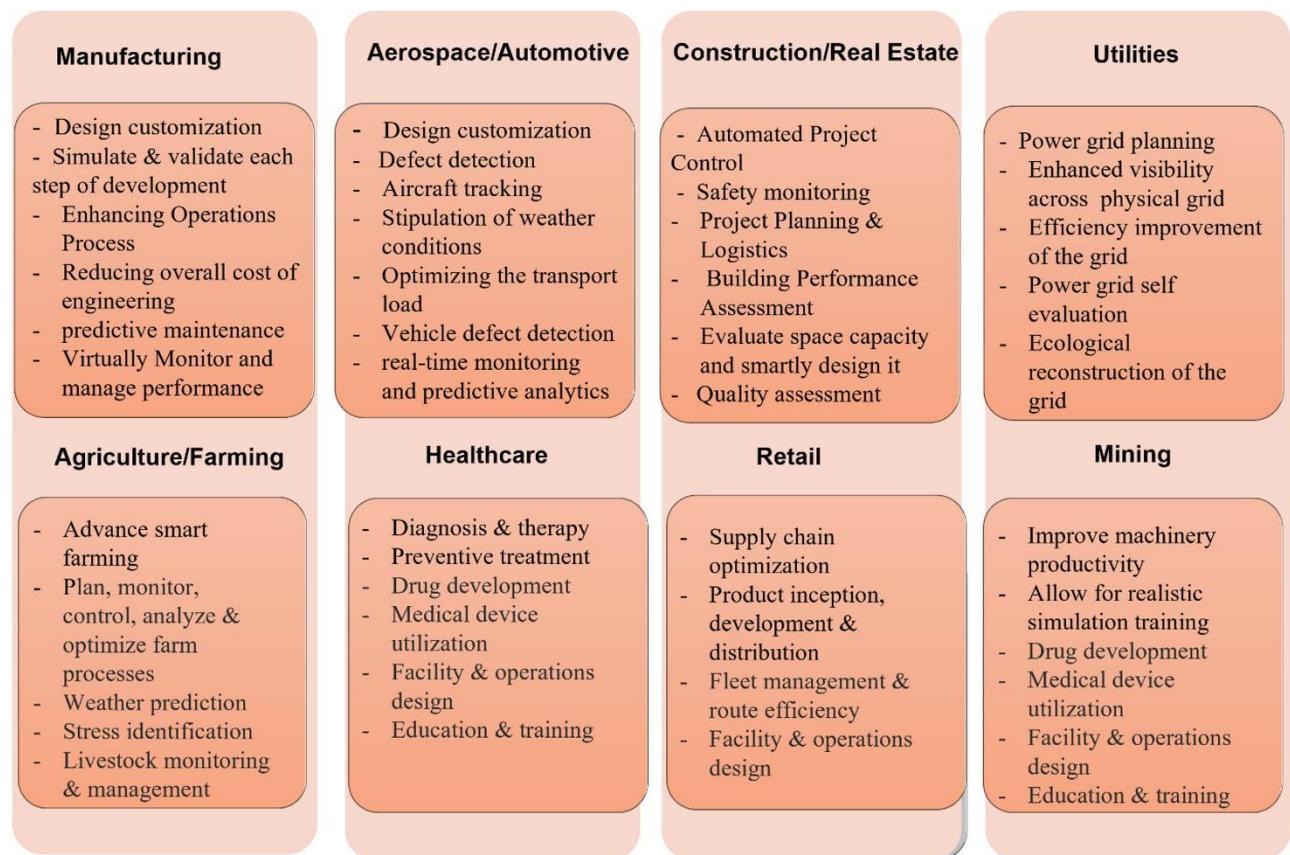


Figura 10. Settori industriali che utilizzano i Digital Twin (Fonte: [181])

2.4.1 Applicazioni nel settore manifatturiero

Il settore manifatturiero è uno dei contesti più avanzati nell'adozione dei Digital Twin, in quanto trova in essi uno strumento strategico per affrontare le sfide legate a efficienza produttiva, qualità, flessibilità e personalizzazione. Nell'ambito dell'Industria 4.0, il gemello digitale permette la replica virtuale di intere linee produttive, impianti e singoli asset, con l'obiettivo di monitorare, simulare, ottimizzare e controllare in tempo reale l'intero ciclo di vita del prodotto.

Negli ultimi decenni, l'evoluzione tecnologica dei Digital Twin ha beneficiato dei progressi nei sistemi di rilevamento, nelle tecnologie IoT e nei modelli di intelligenza artificiale, che hanno consentito di integrare in maniera sempre più precisa il mondo fisico con quello digitale. Le imprese manifatturiere possono così effettuare simulazioni predittive, interventi di manutenzione preventiva, nonché test virtuali per l'introduzione di nuove soluzioni produttive, riducendo drasticamente tempi e costi.

I principali casi d'uso includono il monitoraggio remoto degli impianti, la simulazione del comportamento degli asset in diverse condizioni operative, l'analisi delle prestazioni, il controllo qualità automatizzato e la tracciabilità della produzione. Inoltre, l'adozione dei Digital Twin consente un passaggio da una gestione reattiva a una logica predittiva, permettendo di anticipare anomalie, pianificare le manutenzioni e migliorare l'efficienza complessiva delle risorse.

Un altro ambito in cui il Digital Twin si dimostra particolarmente utile è quello della co-progettazione e dell'ingegneria collaborativa, dove consente simulazioni complesse di prodotto, test di fattibilità e ottimizzazioni virtuali, prima ancora di passare alla produzione fisica. Grazie all'integrazione con sistemi AI, le imprese sono inoltre in grado di raccogliere e analizzare feedback operativi e comportamentali, migliorando la capacità di rispondere in modo personalizzato alle esigenze dei clienti e accelerando l'innovazione.

Nel complesso, il Digital Twin nel manifatturiero non è soltanto una tecnologia di supporto, ma rappresenta un catalizzatore per nuovi modelli organizzativi, operativi e commerciali, offrendo un vantaggio competitivo sostenibile alle imprese che riescono a integrarlo nei propri processi in modo strutturato.

L'elenco delle principali applicazioni dei Digital Twin nel settore manifatturiero da parte delle aziende italiane è riportato nella Tabella 4.

Azienda	Settore	Applicazione del Digital Twin	Benefici principali
Italferr (Gruppo FS)	Infrastrutture ferroviarie	Utilizzo di Digital Twin integrato con BIM per la progettazione, gestione e manutenzione delle infrastrutture ferroviarie	Ottimizzazione della manutenzione, simulazioni strutturali, riduzione errori
Leonardo S.p.A.	Aerospazio / Difesa	Simulazione e test virtuale di sistemi avionici, radar e velivoli tramite modelli digitali	Riduzione dei tempi di collaudo, maggiore affidabilità
Tenova (Techint Group)	Metallurgia e impiantistica	Creazione di modelli digitali per impianti siderurgici e gestione dei processi di fusione	Controllo predittivo, efficienza energetica, riduzione scarti
IVECO (Gruppo CNH)	Automotive	Monitoraggio virtuale dei veicoli durante l'assemblaggio, con gemelli digitali per ogni modello	Tracciabilità della produzione, manutenzione predittiva

Azienda	Settore	Applicazione del Digital Twin	Benefici principali
Industrial)			
Enel Green Power	Energia e rinnovabili	Digital Twin per la simulazione e il monitoraggio di impianti eolici e solari	Ottimizzazione della produzione energetica, gestione preventiva guasti
Danieli Automation	Meccanica pesante	Digital Twin per impianti industriali automatizzati e colate continue	Visualizzazione real-time, simulazioni, formazione virtuale
Thales Alenia Space (Torino)	Spazio e satelliti	Utilizzo di modelli digitali per lo sviluppo e il collaudo di moduli spaziali	Test a terra semplificati, riduzione dei rischi in orbita

Tabella 4. Applicazioni Digital Twin nel settore manifatturiero. Esempi italiani [135]

2.4.2. Agricoltura e agri-tech

Negli ultimi anni, il settore agricolo ha conosciuto una progressiva trasformazione digitale, favorita dall'introduzione di tecnologie avanzate in ambito agronomico. In questo contesto, i Digital Twin stanno emergendo come strumenti strategici per l'agricoltura di precisione, grazie alla loro capacità di modellare digitalmente colture, terreni, impianti di irrigazione, serre e macchinari agricoli.

Nel settore agri-tech, i Digital Twin trovano applicazione in diverse aree operative.

Nel monitoraggio ambientale e nella predizione delle rese. Attraverso la raccolta di dati in tempo reale (su umidità, temperatura, nutrienti del suolo, livelli di irrigazione), il gemello digitale consente di simulare l'evoluzione del raccolto, anticipando problemi legati a stress idrico, parassiti o condizioni climatiche avverse.

Nell'ottimizzazione dell'irrigazione e dei fertilizzanti i modelli digitali sono in grado di elaborare scenari per la gestione efficiente delle risorse, riducendo gli sprechi e migliorando la sostenibilità ambientale.

Nella gestione predittiva dei macchinari agricoli dove i Digital Twin delle attrezzature (es. trattori, mietitrici, droni) permettono una manutenzione preventiva più accurata e il miglioramento dell'efficienza operativa sul campo.

Infine, nelle simulazioni culturali è possibile testare digitalmente differenti strategie agronomiche (rotazione delle colture, semine differenziate, trattamenti fitosanitari) prima della loro applicazione pratica.

Un riepilogo delle applicazioni dei Digital Twin utilizzate dalle aziende italiane nel settore agricolo e delle tecnologie correlate è presentato nella tabella 5.

Azienda / Progetto	Ambito / Applicazione	Benefici principali
xFarm Technologies	Piattaforma di agricoltura digitale per creare il gemello digitale dell'azienda agricola (suolo, colture, macchinari)	Ottimizzazione delle risorse idriche e fertilizzanti, decisioni data-driven
Bonifiche Ferraresi	Uso combinato di Digital Twin e AI per simulazioni su colture cerealicole e orticole	Previsioni di resa, pianificazione delle rotazioni, riduzione sprechi

Azienda / Progetto	Ambito / Applicazione	Benefici principali
Agricolus	Soluzione cloud per Digital Twin di colture e campi con analisi meteo, fenologiche e fitosanitarie	Interventi mirati, riduzione trattamenti, maggiore sostenibilità
Elaisian	Gemelli digitali di uliveti e vigneti tramite sensori e modelli predittivi	Prevenzione malattie, ottimizzazione raccolti, valorizzazione qualità
Corteva Agriscience Italia	Collaborazioni con aziende agricole per creare modelli digitali delle fasi culturali	Migliore pianificazione agronomica, riduzione input chimici
Università di Bologna – progetto SINTETIC	Gemello digitale per la gestione sostenibile delle aziende agricole biologiche	Supporto decisionale, riduzione dell'impatto ambientale

Tabella 5. Applicazioni Digital Twin nel settore agri-tech. Esempi italiani [136]

L'applicazione dei Digital Twin in agricoltura è ancora in fase di sperimentazione in molti contesti, ma mostra un potenziale significativo in termini di sostenibilità, adattamento climatico e sicurezza alimentare, specialmente se integrata con dati satellitari, sensori IoT e intelligenza artificiale.

L'industria agricola è essenziale per il funzionamento di qualsiasi economia. Questo settore è un'importante fonte di cibo e materie prime; è anche una fonte vitale di opportunità di lavoro per l'intera popolazione. Le colture, il bestiame e i prodotti ittici prodotti negli Stati Uniti, insieme alla ristorazione e ad altre industrie legate all'agricoltura, contribuiscono per oltre 750 miliardi di dollari all'anno all'economia [163]. Inoltre, la popolazione mondiale è in aumento e la domanda del mercato per quantità di prodotti e standard qualitativi più elevati è in crescita, rendendo la questione della sicurezza alimentare, della sostenibilità, della produttività e della redditività sempre più importante. Inoltre, la pressione economica sul settore agricolo e le questioni ambientali e del cambiamento climatico sono in aumento [164].

2.4.3. Applicazioni nel settore sanitario

Nel settore sanitario, i Digital Twin rappresentano una frontiera emergente della medicina personalizzata e predittiva. La possibilità di creare repliche digitali di organi, apparati o interi pazienti apre scenari innovativi nella diagnosi, nella pianificazione terapeutica, nel monitoraggio clinico e nella formazione medica.

Nella tabella 6 è illustrato l'elenco delle applicazioni chiave dei Digital Twin adottate dalle aziende italiane nell'ambito sanitario.

Le applicazioni principali dei Digital Twin in ambito sanitario includono la modellazione personalizzata del paziente. Attraverso la raccolta di dati biometrici, clinici e genetici, è possibile creare un gemello digitale di un individuo, utile per simulare l'evoluzione di una patologia o per valutare in anticipo l'efficacia di un trattamento farmacologico o chirurgico (*in silico trials*).

Nella simulazione per la pianificazione di interventi chirurgici dove i Digital Twin di organi (es. cuore, fegato, polmoni) permettono ai medici di testare virtualmente un intervento prima di eseguirlo, riducendo i rischi intra-operatori e migliorando i risultati clinici.

Un altro ambito sanitario in cui vengono utilizzati i Digital Twin è la gestione ospedaliera e l'ottimizzazione delle risorse. È possibile creare gemelli digitali delle strutture sanitarie per ottimizzare i percorsi dei pazienti, l'allocazione del personale, l'uso delle sale operatorie e dei macchinari diagnostici.

Infine, la formazione e la simulazione medica. L'uso della realtà virtuale associata ai Digital Twin consente la creazione di ambienti immersivi per l'addestramento di studenti e professionisti sanitari, basati su scenari realistici e interattivi.

Secondo un report di Deloitte del 2022 [154], i Digital Twin applicati alla sanità potrebbero portare a una riduzione dei tempi di diagnosi del 30%, un miglioramento nella precisione terapeutica del 25% e una diminuzione dei costi ospedalieri fino al 20%. Anche se la diffusione è ancora limitata a centri avanzati, le potenzialità applicative sono ampie, soprattutto con l'evoluzione delle tecnologie di imaging, dei dispositivi wearable e dell'intelligenza artificiale.

Azienda / Istituzione	Ambito di applicazione	Descrizione e benefici
IRCCS Ospedale San Raffaele (Milano)	Gemelli digitali del cuore e del sistema vascolare	Simulazioni personalizzate per la pianificazione di interventi cardiochirurgici; riduzione rischi intra-operatori.
Politecnico di Milano + Humanitas	Digital Twin per simulazioni biomeccaniche	Progetto congiunto per creare gemelli digitali di organi (fegato, cuore) per test non invasivi e supporto decisionale clinico.
Università di Bologna – progetto DTH (Digital Twin Hospital)	Ottimizzazione gestione ospedaliera	Modelli digitali per ottimizzare flussi di pazienti, allocazione di risorse e ridurre tempi di attesa.
Bracco Imaging	Simulazioni diagnostiche per imaging avanzato (MRI, TAC)	Utilizzo di gemelli digitali per calibrare apparecchiature e personalizzare protocolli su misura del paziente.
Inpeco (Val della Torre, TO)	Tracciabilità e automazione dei flussi ospedalieri di laboratorio	Uso di gemelli digitali per replicare il laboratorio clinico, migliorare la logistica interna e ridurre errori diagnostici.
Engineering Ingegneria Informatica S.p.A.	Piattaforme Digital Twin per ospedali intelligenti	Soluzioni software per costruire rappresentazioni digitali integrate di infrastrutture, pazienti e risorse cliniche.

Tabella 6. Applicazioni Digital Twin nel settore sanitario. Esempi italiani [137]

2.4.4 Applicazioni nell'industria automobilistica

Nel comparto automotive, i Digital Twin vengono impiegati sia nella fase di progettazione sia nella produzione, consentendo un notevole risparmio di tempo e risorse. Tesla, ad esempio, sviluppa per ogni veicolo venduto un gemello digitale multicanale che raccoglie dati da sensori, app e infrastrutture di ricarica, utilizzati per il monitoraggio continuo e la manutenzione predittiva [145].

Anche case storiche come Renault e Ford hanno adottato sistemi di Digital Twin. Renault ne ha realizzato uno già durante la fase di design nel 2022, riducendo il ciclo di progettazione da un anno a un trimestre grazie al feedback dal gemello digitale. Ford, invece, utilizza Digital Twin per ottimizzare componenti specifici, come i gruppi ottici, simulando la diffusione della luce prima di realizzare il prototipo fisico [145].

Un case study del settore mostra, inoltre, che un Digital Twin applicato a linee di montaggio ha portato ad un aumento dell'efficienza del 6 % e a perdite di fermo macchina ridotte dell'87 % [146]. Infine, BMW ha replicato la fabbrica di Regensburg in un ambiente virtuale (Nvidia Omniverse), migliorando la progettazione ergonomica, l'ottimizzazione del layout e la formazione degli operatori, con un'accelerazione dei tempi di sviluppo superiori al 25 % [147].

Nella tabella 7 è riportato l'elenco delle principali applicazioni dei Digital Twin nel settore dell'industria automobilistica da parte delle aziende italiane.

Azienda	Ambito di applicazione	Descrizione e benefici
Stellantis (ex FCA)	Simulazione e ottimizzazione della produzione	Utilizzo di gemelli digitali per simulare le linee produttive e ottimizzare l'assemblaggio di auto in stabilimenti come Melfi e Cassino. Riduzione dei tempi di avvio e dei difetti di produzione.
Magneti Marelli (ora Marelli)	Test virtuali di componenti elettronici e meccatronici	Digital Twin per la verifica in tempo reale di centraline, sensori e moduli di controllo. Aumento dell'affidabilità e riduzione dei test fisici.
Dallara Automobili	Sviluppo e collaudo virtuale di vetture da corsa	Uso di Digital Twin aerodinamici per simulazioni CFD e test strutturali su monoposto. Maggiore efficienza in fase di progettazione.
Pirelli	Sviluppo di pneumatici intelligenti	Gemelli digitali degli pneumatici per raccogliere dati in pista e ottimizzare la progettazione e le performance su strada. Integrazione con AI e guida autonoma.
FPT Industrial (Gruppo CNH)	Ottimizzazione motori e powertrain	Modelli digitali per il monitoraggio delle prestazioni dei motori diesel e gas. Miglioramento della diagnostica predittiva e riduzione dei consumi.
Italdesign – Gruppo VW	Design e verifica funzionale in ambiente virtuale	Integrazione di Digital Twin in ambienti di realtà virtuale per validazione estetica e funzionale dei concept car.

Tabella 7. Applicazioni Digital Twin nel settore automobilistico. Esempi italiani [138]

2.4.5 Applicazioni nel settore aeronautico/aerospaziale

Nel settore aerospaziale il Digital Twin rappresenta un acceleratore di efficienza in progettazione, test e manutenzione. Rolls-Royce sfrutta questi modelli virtuali per simulare il comportamento dei motori in condizioni estreme, riducendo drasticamente la necessità di prototipi fisici [148].

Altri OEM (Original Equipment Manufacturer) aeronautici (tra cui aziende coinvolte in programmi come il Global Combat Air Programme UK-Italia-Giappone) utilizzano Digital Twin completi per validare in anticipo interi sistemi, ottenendo significativi risparmi di tempo e denaro [149].

Per quanto riguarda la produzione, Siemens ha collaborato con startup (es. Natilus) per creare repliche digitali immersive di intere linee di assemblaggio, utilizzando headset VR per simulare operazioni in grandi ambienti come hangar [44].

Altri casi includono l'uso del Digital Twin per i sistemi di propulsione elettrica: l'Università di Nottingham, in partnership con Altair, sviluppa modelli predittivi per batterie e motori, capaci di fornire una manutenzione accurata basata su dati in tempo reale [148] [149].

Nella tabella 8 è illustrato l'elenco delle applicazioni chiave dei Digital Twin adottate dalle aziende italiane nell'aeronautico e aerospaziale.

Azienda / Istituzione	Ambito di applicazione	Descrizione e benefici principali
Leonardo S.p.A.	Aerostrutture, elicotteri, avionica	Utilizza Digital Twin per simulazioni strutturali e funzionali di elicotteri e velivoli militari (es. AW609, C-27J); monitoraggio in tempo reale e manutenzione predittiva.
Thales Alenia Space (Torino)	Moduli spaziali, satelliti, stazioni orbitanti	Modelli digitali per test a terra, validazione di sistemi di bordo, e simulazione di condizioni orbitali per moduli come Cygnus e Lunar Gateway.
Avio S.p.A.	Lanciatori spaziali (Vega, Vega C)	Sviluppo di Digital Twin per motori a propellente solido e turbopompe criogeniche. Ottimizzazione performance e riduzione tempi di collaudo.
ITA Aircraft Division (ex Alenia Aeronautica)	Aerodinamica e simulazioni di volo	Uso di gemelli digitali per modellazione del comportamento aerodinamico in fase di progettazione.
CIRA – Centro Italiano Ricerche Aerospaziali	Ricerca e test su materiali, strutture e motori aeronautici	Progetti con Digital Twin per validare materiali innovativi e simulare condizioni di volo critiche (es. test ipersonici).
Politecnico di Torino + Leonardo	Progetto congiunto di ricerca sull'uso del Digital Twin in manutenzione aeronautica	Riduzione costi operativi, miglioramento sicurezza, tracciabilità avanzata.

Tabella 8. Applicazioni Digital Twin nel settore aeronautico/aerospaziale. Esempi italiani [139]

2.4.6 Applicazioni nel settore delle costruzioni civili e industriali

L'utilizzo dei Digital Twin come repliche virtuali di asset fisici nei settori delle costruzioni e immobiliare può rivoluzionare la gestione di asset e progetti. I Digital Twin come modelli virtuali di una risorsa fisica presentano somiglianze con il Building Information Modeling (BIM), utilizzato da molti anni dai professionisti del settore edile. Il BIM è la rappresentazione digitale delle caratteristiche fisiche e funzionali di un edificio o di un progetto di costruzione [155]. Fornisce una risorsa di conoscenza condivisa per informazioni su un edificio o un progetto, comprese descrizioni geometriche, relazioni spaziali, informazioni geografiche, quantità e proprietà dei componenti edilizi [156]. Mentre il BIM fornisce dati statici, i Digital Twin, utilizzando sensori, forniscono dati in tempo reale che i responsabili dei lavori, i progettisti o i loro clienti possono utilizzare per monitorare i progetti in tempo reale [157]. Utilizzando i Digital Twin, i gruppi di lavoro possono monitorare il processo di costruzione, identificare potenziali problemi e adattare le strategie per garantire che i progetti siano completati in sicurezza, nei tempi previsti e nel rispetto del budget, con la qualità concordata. Inoltre, le soluzioni Digital Twin nel settore edile possono aiutare a tracciare altre risorse, come ad esempio, materiali, manodopera e attrezzature, monitorare la sicurezza e condurre la pianificazione delle risorse e la logistica [158].

I Digital Twin possono fornire una panoramica completa del bene fisico nel settore immobiliare, consentendo ad agenti o proprietari di immobili di raccogliere e analizzare dati relativi alle prestazioni e alle condizioni del bene.

Come si può vedere nella tabella 9, le aziende italiane stanno impiegando i Digital Twin in diverse applicazioni fondamentali all'interno del settore delle costruzioni civili e industriali.

In breve, l'utilizzo dei Digital Twin nel settore edile e immobiliare ha il potenziale per generare un'efficienza senza precedenti in termini di costi, tempi, sostenibilità e sicurezza, rendendolo uno strumento prezioso per l'intero settore edile.

Azienda / Ente	Ambito di applicazione	Descrizione e benefici principali
Italferr (Gruppo Ferrovie dello Stato)	Infrastrutture ferroviarie e ponti	Utilizza Digital Twin integrati con BIM per modellare ponti, gallerie e stazioni. Migliora la manutenzione predittiva e la sicurezza delle infrastrutture.
RFI – Rete Ferroviaria Italiana	Gestione reti e stazioni	Sviluppo di gemelli digitali per la gestione operativa di grandi hub come Roma Termini e Milano Centrale.
Autostrade per l'Italia (ASPI)	Infrastrutture autostradali (ponti, viadotti, gallerie)	Progetto “Digital Twin delle Infrastrutture” per monitoraggio strutturale in tempo reale e manutenzione preventiva.
Italcementi (Heidelberg Materials)	Smart building e materiali intelligenti	Studio dei comportamenti dei materiali da costruzione con modelli digitali. Ottimizzazione ambientale e prestazionale degli edifici.
Manens-Tifs (progetto Smart Building)	Progettazione e gestione di edifici complessi (ospedali, università)	Implementazione di Digital Twin per il controllo energetico, manutenzione e simulazione dei flussi in tempo reale.

Azienda / Ente	Ambito di applicazione	Descrizione e benefici principali
Italfabbrica S.r.l.	Cantieristica e prefabbricazione	Utilizzo di Digital Twin per progettazione parametrica e coordinamento delle fasi di prefabbricazione industriale.
Università La Sapienza + Roma Capitale	Monitoraggio strutturale urbano tramite gemelli digitali	Modellazione di edifici storici e moderni per prevenzione sismica e manutenzione urbana predittiva.

Tabella 9. Applicazioni Digital Twin nel settore delle costruzioni civili e industriali. Esempi italiani [140]

2.4.6 Applicazioni nel settore energetico e delle utilities

Nel settore dell'energia e delle utilities, i Digital Twin trovano ampio impiego nella gestione intelligente delle reti, nell'ottimizzazione degli impianti di produzione e nella manutenzione predittiva di infrastrutture critiche. L'integrazione tra Digital Twin, IoT e AI consente di monitorare in tempo reale parametri fondamentali come tensione, temperatura, flussi idrici o livelli di consumo, migliorando la resilienza e l'efficienza delle reti.

Le applicazioni principali in questo ambito sono piuttosto variegate e includono, in primo luogo, il settore delle centrali elettriche, sia quelle tradizionali che quelle basate su fonti rinnovabili. Qui, le tecnologie vengono impiegate per ottimizzare il funzionamento delle turbine, simulare i flussi di carico e identificare precocemente eventuali anomalie meccaniche, migliorando l'efficienza e la sicurezza degli impianti.

Un altro campo di applicazione fondamentale è quello delle reti intelligenti (smart grid). In questo contesto, l'obiettivo principale è la gestione ottimizzata della distribuzione energetica, che si concretizza nella previsione accurata dei picchi di domanda, nella simulazione di diversi scenari di carico e in un bilanciamento più efficace delle fonti rinnovabili, spesso intermittenti.

Infine, queste soluzioni trovano spazio anche nella distribuzione idrica e del gas. Qui, il loro utilizzo è mirato soprattutto al monitoraggio costante delle reti di distribuzione per garantirne l'efficienza e, aspetto cruciale, al rilevamento tempestivo di perdite.

Un caso concreto è quello di Enel Green Power [141], che utilizza Digital Twin per monitorare e ottimizzare in tempo reale le prestazioni dei parchi eolici e fotovoltaici, migliorando la gestione operativa e riducendo i tempi di inattività degli impianti. Anche GE Digital ha sviluppato una piattaforma di Digital Twin per centrali termoelettriche che ha portato, in alcuni casi, a un incremento dell'efficienza operativa del 3–5% e a una riduzione dei costi di manutenzione fino al 25% [161].

L'adozione dei Digital Twin nelle utilities è particolarmente strategica anche per il monitoraggio ambientale, il rispetto delle normative ambientali e l'interazione con le smart city, dove edifici, trasporti e reti energetiche sono interconnessi in tempo reale.

Un riepilogo delle principali applicazioni dei Digital Twin adottate dalle aziende italiane nel settore energetico è fornito nella tabella 10.

Azienda / Ente	Ambito di applicazione	Descrizione e benefici principali
Enel Green Power	Energie rinnovabili (eolico, solare, idroelettrico)	Utilizza gemelli digitali per il monitoraggio in tempo reale di impianti, simulazione produzione e manutenzione predittiva.
Terna S.p.A.	Reti elettriche nazionali (trasmissione)	Modelli digitali per simulare e bilanciare la rete, prevenire sovraccarichi e ottimizzare la manutenzione delle infrastrutture.
SNAM	Rete nazionale di gas metano	Implementazione di Digital Twin per pipeline, compressori e impianti di rigassificazione. Ottimizzazione dei flussi e riduzione dei rischi.
IREN	Multiservizi (acqua, energia, rifiuti, teleriscaldamento)	Gemelli digitali per la gestione dei flussi termici e idrici, la manutenzione preventiva degli impianti e la riduzione delle perdite.
Acea S.p.A.	Gestione integrata acqua, energia e ambiente	Utilizzo di Digital Twin per reti idriche e fognarie con simulazioni predittive e gestione in tempo reale delle infrastrutture urbane.
RSE (Ricerca Sistema Energetico)	Ricerca su impianti elettrici e termici	Sviluppa gemelli digitali per la simulazione della flessibilità energetica e la gestione ottimale delle microreti.

Tabella 10. Applicazioni Digital Twin nel settore energetico e delle utilities. Esempi italiani [141]

2.4.7 Applicazioni nel settore minerario ed estrattivo

Il settore minerario ed estrattivo, tradizionalmente caratterizzato da un'elevata intensità di capitale e da condizioni operative complesse e pericolose, rappresenta un contesto in cui l'adozione dei Digital Twin può apportare benefici significativi in termini di efficienza operativa, sicurezza e sostenibilità ambientale. In particolare, il Digital Twin consente di replicare virtualmente interi giacimenti, impianti di estrazione e infrastrutture logistiche, offrendo strumenti avanzati di monitoraggio, simulazione e previsione.

Le principali applicazioni in questo ambito sono diverse. Si parte dalla mappatura dinamica dei giacimenti. Integrando dati geologici, rilievi sismici, sensori ambientali e modelli 3D, è possibile creare un gemello digitale del sottosuolo per prevedere con maggiore precisione la posizione e la qualità delle risorse.

Un'altra applicazione fondamentale è la pianificazione delle attività estrattive, dove il Digital Twin permette di simulare diverse strategie di scavo e trasporto del materiale, ottimizzando tempi, costi e riducendo l'impatto ambientale.

Inoltre, queste tecnologie sono cruciali per il monitoraggio strutturale e ambientale dove l'uso dell'IoT su pareti rocciose, gallerie, bacini di contenimento o discariche consente il rilevamento in tempo reale di frane, sedimenti o fuoriuscite pericolose.

Infine, trovano impiego nella manutenzione predittiva degli impianti. Macchinari come pompe, nastri trasportatori e trivelle possono essere associati a Digital Twin per anticipare guasti e minimizzare i tempi di fermo.

Un caso rilevante è quello di Anglo American, una delle principali multinazionali del settore estrattivo, che ha sviluppato una piattaforma di Digital Twin chiamata *Digital Mine* per monitorare in tempo reale la produttività, le condizioni di sicurezza e le emissioni delle sue miniere in Sudafrica e Sud America. L'uso combinato di sensori, AI e modelli digitali ha permesso di ridurre del 30% le interruzioni operative e di migliorare l'efficienza energetica del 15% [159].

Un altro esempio è rappresentato dalla società australiana BHP, che utilizza Digital Twin per modellare dinamicamente i flussi logistici tra i siti di estrazione e i porti di esportazione, integrando dati su trasporti ferroviari, clima e disponibilità delle infrastrutture. Questo ha contribuito a ottimizzare la catena di fornitura e ridurre i costi logistici complessivi [160].

Nonostante la diffusione dei Digital Twin in ambito minerario sia ancora in fase iniziale rispetto ad altri settori, il loro potenziale risulta particolarmente rilevante per affrontare le sfide legate a sicurezza, variabilità geologica e impatto ambientale, che rappresentano elementi chiave per l'innovazione sostenibile del comparto.

Nella tabella 11 è riportato l'elenco delle principali applicazioni dei Digital Twin nel settore minerario ed estrattivo da parte delle aziende italiane.

Azienda / Ente	Ambito di applicazione	Descrizione e benefici principali
Italmatch Chemicals (Genova)	Estrazione e trattamento di minerali industriali	Gemelli digitali per la simulazione dei processi chimici e termici nei trattamenti dei sali fosfatici. Ottimizzazione di energia, materie prime e sicurezza.
Sardegna Ricerche + Università di Cagliari	Progetto pilota per estrazione sostenibile in miniere dismesse	Creazione di modelli digitali 3D per monitoraggio geotecnico, rischio ambientale e riutilizzo delle strutture minerarie in chiave green.
ENI (Eni Natural Resources)	Estrazione petrolifera e gas (onshore/offshore)	Utilizzo di Digital Twin per modellazione dei giacimenti, simulazioni di flusso e manutenzione predittiva di impianti.
Solvay Chimica Italia	Estrazione sali da salamoie sotterranee (Rosignano Solvay)	Integrazione di sensoristica e Digital Twin per monitorare pozzi e impianti in tempo reale, prevenire corrosione e migliorare performance.
Università di Bologna – Dip. Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale	Progetti di modellazione numerica per cave e miniere	Ricerca su Digital Twin geotecnici per la previsione di sedimenti, impatti ambientali e gestione sostenibile delle risorse.

Tabella 11. Applicazioni Digital Twin nel settore minerario ed estrattivo. Esempi italiani [142]

2.4.8 Applicazioni nel settore Retail & Customer Experience

Nel settore retail, i Digital Twin vengono utilizzati per creare repliche virtuali di punti vendita, supply chain e profili cliente, con l'obiettivo di migliorare in modo significativo l'esperienza del cliente, ottimizzare la gestione operativa e ridurre i costi. L'innovazione più rilevante riguarda la realizzazione di modelli virtuali

del layout dei negozi, che permettono di testare le configurazioni merceologiche, il flusso dei clienti e il posizionamento dei prodotti senza intervenire realmente sul punto vendita [144].

Un esempio emblematico è Walmart, che ha sviluppato Digital Twin di oltre 1700 negozi, in collaborazione con NVIDIA, per simulare layout in 3D e analizzare le “planogram” in chiave evoluta, consentendo decisioni basate sui comportamenti reali dei consumatori [150]. Anche Lowe’s sta utilizzando queste tecnologie, supportate da piattaforme come Omniverse di NVIDIA, per ottimizzare l’assortimento stagionale, il traffico nei corridoi e la disposizione dei prodotti [151].

La tecnologia dei Digital Twin trova impiego anche in altri ambiti cruciali. Viene utilizzata, ad esempio, per la personalizzazione dell’esperienza cliente, attraverso soluzioni innovative come camerini di prova virtuali o configurazioni di prodotto in tempo reale, che si basano sull’analisi approfondita dei dati demografici e comportamentali [152].

Un’altra applicazione rilevante è la gestione intelligente dell’inventario: integrando dati provenienti dai sistemi POS, dai sensori RFID e dalla tecnologia IoT, è possibile monitorare costantemente i livelli di stock, prevenire l’esaurimento dei prodotti sugli scaffali e ottimizzare l’intera logistica di magazzino [153].

In Italia, come si vede dalla tabella 12, gruppi come ShopFully (ex Tiendeo) stanno esplorando l’applicazione dei Digital Twin a strategie di drive-to-store: le piattaforme esaminano dati geografici e comportamentali per simulare l’efficacia delle campagne promozionali e migliorare il traffico nei negozi fisici [144].

In sintesi, sebbene l’uso dei Digital Twin nel settore del retail sia ancora in una fase emergente, si sta affermando come una leva strategica fondamentale. Questa tecnologia permette di ottenere diversi benefici. Consente innanzitutto di aumentare l’efficacia delle configurazioni dei punti vendita, grazie a simulazioni che riducono i costi di allestimento. Inoltre, potenzia l’esperienza d’acquisto personalizzata, sfruttando l’integrazione di tecnologie immersive e omnicanali. Infine, contribuisce a migliorare l’efficienza operativa generale, ottimizzando la gestione dell’inventario, il layout degli spazi espositivi e la pianificazione logistica.

Tali applicazioni rappresentano una frontiera di innovazione promettente, soprattutto in chiave omnichannel, fedeltà del cliente e automazione della gestione retail.

Azienda	Applicazione Digital Twin	Descrizione e benefici principali
ShopFully	Simulazione dell’impatto delle promozioni e strategie drive-to-store	Migliore targeting delle promozioni, aumento del traffico nei punti vendita, supporto decisionale basato su dati di comportamento geolocalizzati
Benetton Group	Ottimizzazione della logistica integrata tra canale fisico ed e-commerce	Gestione dinamica dell’inventario, riduzione degli sprechi, miglioramento del servizio clienti
Coop Italia	Modellazione digitale del comportamento dei clienti all’interno del supermercato	Ottimizzazione della disposizione dei prodotti, incremento delle vendite, miglior customer journey
Calzedonia Group	Monitoraggio dell’esperienza cliente e gestione intelligente degli spazi retail	Riduzione del time-to-market, adattamento rapido delle collezioni, maggiore efficacia delle scelte di visual merchandising

Tabella 12. Applicazioni Digital Twin nel settore del retail e customer experience. Esempi italiani [143]

2.5 Sintesi comparativa

L'analisi delle applicazioni dei Digital Twin nei vari settori produttivi evidenzia una crescente diffusione di questa tecnologia, sebbene con finalità, maturità e modalità d'uso differenti a seconda del contesto industriale.

Il settore manifatturiero è il comparto che ha adottato in maniera più estesa e matura i Digital Twin, con applicazioni che spaziano dalla simulazione dei processi produttivi alla manutenzione predittiva e alla personalizzazione dei prodotti. Le grandi aziende italiane, come Stellantis e Dallara, integrano i Digital Twin nei processi di progettazione e testing virtuale.

In agricoltura seppur in fase più sperimentale, i Digital Twin stanno trovando impiego nella gestione agronomica, nel monitoraggio climatico e del suolo, e nella tracciabilità della filiera agroalimentare. L'agricoltura di precisione in Italia è spinta da startup innovative (es. xFarm, Elaisian) e progetti universitari.

Nel comparto sanitario i Digital Twin sono utilizzati per simulazioni personalizzate dei pazienti, ottimizzazione dei flussi ospedalieri e progettazione di percorsi terapeutici. L'applicazione è molto avanzata in ambiti ad alta tecnologia come la chirurgia cardiovascolare (es. IRCCS San Raffaele, Bracco Imaging).

I settori automotive e aerospazio presentano un utilizzo avanzato, dove i Digital Twin sono impiegati per la prototipazione virtuale, il monitoraggio in volo o su strada, e l'integrazione con AI e sensoristica. Leonardo, Pirelli, Avio e Thales Alenia Space rappresentano casi eccellenti italiani.

Nelle costruzioni civili e industriali l'integrazione tra BIM e Digital Twin è centrale, soprattutto per la gestione delle infrastrutture complesse (autostrade, ferrovie, ospedali). Aziende come Italferr e Autostrade per l'Italia utilizzano gemelli digitali per la manutenzione e la sicurezza strutturale.

L'adozione dei Digital Twin nel settore minerario ed estrattivo è ancora in fase iniziale, ma emergono applicazioni promettenti legate alla modellazione geotecnica, al monitoraggio ambientale e all'ottimizzazione degli impianti (es. Italmatch, Solvay, Eni).

Uno dei settori più promettenti per l'implementazione dei Digital Twin a livello sistematico è quello delle utilities ed energia. Enel, SNAM e Acea utilizzano questa tecnologia per la gestione delle reti, il monitoraggio in tempo reale e la simulazione predittiva dei flussi energetici e idrici.

In sintesi, mentre settori come manifattura, automotive, aerospazio ed energia mostrano già una maturità tecnologica elevata, altri come agricoltura, sanità pubblica e settore estrattivo stanno progressivamente sperimentando e implementando soluzioni Digital Twin. Le finalità comuni emergenti sono l'ottimizzazione dei processi, la manutenzione predittiva, il miglioramento dell'efficienza operativa e la sostenibilità ambientale.

2.6 Vantaggi, criticità e prospettive future

L'analisi dei diversi settori applicativi ha evidenziato come i Digital Twin rappresentino una tecnologia trasversale e strategica, capace di generare valore in molteplici contesti industriali. Le applicazioni pratiche spaziano dalla produzione manifatturiera alla sanità, dall'energia all'edilizia, fino all'industria mineraria, con benefici concreti in termini di efficienza, sicurezza, personalizzazione e sostenibilità.

Tra i principali vantaggi riconosciuti in letteratura e nei casi aziendali analizzati, si può notare un significativo miglioramento delle performance operative, reso possibile dall'ottimizzazione dei processi in tempo reale e dalla simulazione preventiva di scenari complessi.

Questa tecnologia consente anche una notevole riduzione dei costi, in particolare quelli legati a guasti, manutenzione, progettazione e test fisici.

Inoltre, si registra un aumento della qualità e della sicurezza grazie al monitoraggio continuo di impianti, prodotti o ambienti ad alto rischio. I dati storici e in tempo reale supportano in modo efficace il decision making, fornendo analisi predittive e prescrittive.

L'impiego di queste soluzioni contribuisce anche ad accelerare l'innovazione, permettendo di testare virtualmente nuove soluzioni prima della loro implementazione fisica, e favorisce la sostenibilità ambientale, grazie a un uso più efficiente delle risorse e a una riduzione complessiva dell'impatto.

Tuttavia, nonostante le notevoli potenzialità, l'adozione dei Digital Twin presenta anche diverse criticità. Tra le principali barriere che emergono vi è l'elevata complessità tecnologica, che richiede l'integrazione sinergica di hardware, software e sistemi di analisi avanzata. A ciò si aggiungono costi iniziali significativi, che rappresentano spesso un ostacolo, in particolare per le PMI che hanno difficoltà ad accedere a infrastrutture digitali così complesse.

Un altro fattore limitante è la scarsità di competenze specializzate, con una carenza di professionisti in ambiti cruciali come la data science, la modellazione 3D, la cybersecurity e la gestione dei dati. Si riscontrano inoltre problemi di interoperabilità, dovuti alla necessità di far coesistere sistemi preesistenti con le nuove tecnologie implementate.

Infine, permangono giustificate preoccupazioni per la sicurezza e la protezione dei dati, una criticità particolarmente sentita e rilevante nei settori ad alto rischio come la sanità, la difesa e l'energia.

Come si evince dalla figura 9 le prospettive future per i Digital Twin appaiono comunque estremamente positive. Secondo stime recenti [162], il mercato globale dei Digital Twin è destinato a raggiungere i 120 miliardi di dollari entro il 2030, con un tasso di crescita annuo superiore al 35%.

I principali fattori trainanti per questo sviluppo saranno la crescente diffusione dell'Internet of Things industriale (IIoT), lo sviluppo di piattaforme cloud-native e di ambienti immersivi, come il Metaverso industriale. A sostenere questa evoluzione contribuiranno anche le politiche pubbliche volte a incentivare la digitalizzazione e la transizione ecologica.

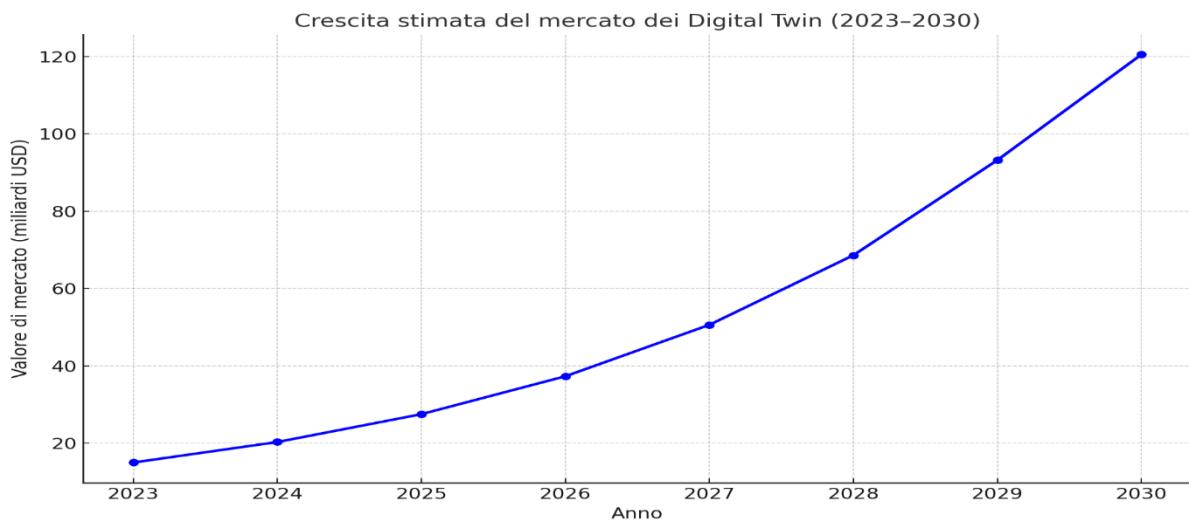


Figura 9. Crescita del mercato dei Digital Twin. Fonte Markets and Markets 2023

Infine, l'integrazione dei Digital Twin con tecnologie emergenti come la realtà aumentata, la blockchain e i sistemi cyber-fisici autonomi aprirà nuovi scenari per la gestione di ecosistemi produttivi interconnessi, resilienti e sostenibili.

Queste tendenze offrono un contesto particolarmente fertile per l'analisi empirica condotta nella presente tesi, volta a indagare il livello di conoscenza, adozione e interesse verso i Digital Twin all'interno delle imprese italiane.

3. METODOLOGIA DELL'INDAGINE

3.1 Obiettivo dell'indagine

L'indagine ha avuto come target le aziende italiane operanti in settori ad alto potenziale di digitalizzazione, in particolare nei comparti manifatturieri, energetici, infrastrutturali, biomedicali e ICT, notoriamente esposti all'applicazione di tecnologie come i Digital Twin.

L'indagine è stata progettata con l'obiettivo di esplorare il grado di conoscenza, adozione e percezione delle tecnologie Digital Twin (DT) nelle aziende italiane, all'interno del più ampio contesto della trasformazione digitale abilitata dal paradigma dell'Industria 4.0.

In particolare, il questionario si propone di analizzare la diffusione effettiva e programmata dei Digital Twin all'interno dei processi aziendali, considerando diversi settori e dimensioni d'impresa. L'obiettivo è anche quello di valutare il livello di consapevolezza tecnologica rispetto alle tecnologie abilitanti fondamentali, come IoT, Intelligenza Artificiale (AI), Sistemi Cyberfisici (CPS), Cloud e Big Data, che costituiscono l'infrastruttura di base per l'implementazione dei DT.

L'indagine mira, inoltre, a indagare le motivazioni strategiche che spingono o scoraggiano l'adozione di queste soluzioni, evidenziando i benefici percepiti, gli ostacoli operativi, i vincoli normativi e le aspettative relative al ritorno sull'investimento. Verranno rilevati gli ambiti di applicazione attuali e futuri dei DT lungo l'intera catena del valore (produzione, logistica, manutenzione, governance, CRM, sostenibilità) e in settori specifici.

Infine, il questionario intende approfondire il legame tra l'adozione dei DT e la maturità digitale complessiva dell'impresa, prendendo in considerazione anche le iniziative già intraprese nell'ambito dell'Industria 4.0 e l'eventuale ricorso a incentivi pubblici.

L'indagine adotta un approccio metodologico misto, che combina elementi quantitativi e qualitativi, con lo scopo di costruire una base empirica solida e funzionale. Questo approccio è utile sia per descrivere in modo accurato lo stato dell'arte dell'adozione dei Digital Twin all'interno delle imprese italiane, sia per identificare i principali trend emergenti, i gap di implementazione ancora presenti e le potenziali implicazioni strategiche di questa tecnologia.

3.2 Struttura e contenuti del questionario

Il questionario è stato progettato come strumento di rilevazione empirica volto a esplorare, in modo sistematico, il livello di conoscenza, adozione e percezione delle tecnologie Digital Twin nelle imprese italiane.

La struttura dell'indagine è stata organizzata in quattro sezioni tematiche, pensate per permettere un'analisi multilivello del fenomeno. Si parte dai dati anagrafici aziendali, si passa poi alla valutazione della conoscenza e dell'applicazione dei concetti legati all'Industria 4.0, per arrivare infine a un focus diretto sull'uso e l'implementazione e l'utilizzo specifici dei Digital Twin.

Sezione 1 (domande da 1 a 17). Profilo dell'azienda e del rispondente

Questa sezione è dedicata alla raccolta di informazioni di base relative sia all'impresa che alla figura del compilatore. Nello specifico, sono richieste informazioni sulla tipologia d'impresa, il settore di appartenenza, l'ambito di attività in cui opera, la dimensione (numero di dipendenti e fatturato) e l'anno di fondazione. Vengono inoltre indagate la filiera, i clienti e le relazioni con il mercato. Infine, si richiedono informazioni sulla gestione operativa e sull'apertura all'innovazione.

Lo scopo è quello di costruire una mappa del campione e permettere successive analisi incrociate tra variabili strutturali e adozione tecnologica.

Sezione 2 (domande da 18 a 34). Livello di conoscenza dei concetti afferenti al paradigma Industria 4.0

Questa parte dell'indagine è dedicata ad approfondire il grado di familiarità e l'effettiva implementazione delle tecnologie che costituiscono l'ecosistema fondamentale dell'Industria 4.0. Tra queste, vengono specificamente indagati ambiti come l'Internet of Things (IoT), il Cloud Computing, la Big Data Analytics, l'Intelligenza Artificiale, i Cyber-Physical Systems e l'Additive Manufacturing, oltre ai sistemi di simulazione e automazione avanzata.

L'indagine prosegue approfondendo la conoscenza, da parte delle imprese, dei bandi "Industria 4.0" volti a finanziare gli investimenti e la loro familiarità con la normativa relativa alla sicurezza dei dati e la conformità al GDPR.

La sezione si conclude analizzando Cloud, la condivisione dei dati e le prospettive future della digitalizzazione.

Le risposte permettono di valutare la maturità digitale delle aziende e il loro posizionamento rispetto al paradigma 4.0.

Sezione 3 (domande da 35 a 38). Implementazione effettiva dei concetti di Industria 4.0

Questa sezione si concentra sull'esplorazione delle attività strategiche e delle priorità aziendali. Nello specifico, l'analisi indaga il grado di digitalizzazione raggiunto, l'effettiva implementazione tecnologica e i benefici che ne derivano, oltre a esaminare i piani strategici di innovazione futuri delle imprese.

L'obiettivo è analizzare il grado di implementazione dell'innovazione tecnologica, i benefici che ne derivano e il livello di maturità digitale raggiunto dall'azienda

Sezione 4 (domande da 39 a 54). Conoscenza, implementazione e utilizzo dei Digital Twin

Questa sezione si concentra sia sulla conoscenza teorica che sull'adozione pratica dei Digital Twin. Nello specifico, l'indagine esplora la familiarità che le aziende hanno con il concetto di Digital Twin e le fonti da cui hanno appreso tale nozione.

Si procede poi ad analizzare l'adozione attuale o pianificata di questa tecnologia, identificando i contesti applicativi principali, che spaziano dalla progettazione alla simulazione, dalla produzione alla manutenzione, fino alla logistica, alla gestione dei dati e alla sostenibilità. Infine, vengono esaminati i vantaggi attesi o già ottenuti, come la riduzione dei costi, l'incremento dell'efficienza, l'implementazione della manutenzione predittiva e il miglioramento dei processi decisionali.

La parte finale del questionario raccoglie informazioni relative alle percezioni degli intervistati su diversi aspetti cruciali. Vengono indagati, in particolare, i fattori critici che ostacolano l'adozione dei Digital Twin, come i costi elevati, la mancanza di competenze specifiche, i vincoli normativi e le difficoltà di integrazione con i sistemi esistenti.

Parallelamente, si analizzano i fattori abilitanti che potrebbero favorirne la diffusione, quali il supporto da parte di enti pubblici, l'offerta di formazione tecnica adeguata e la disponibilità di incentivi fiscali.

Infine, la sezione si conclude con un'analisi delle prospettive future, esplorando l'intenzione delle aziende di adottare i Digital Twin, le aree prioritarie di applicazione previste e le aspettative di evoluzione della tecnologia nel medio periodo.

Nel complesso, il questionario è composto da 54 domande, prevalentemente a risposta chiusa (dicotomiche, scelta multipla e scale Likert), integrate da alcune domande a risposta aperta per raccogliere elementi qualitativi e commenti personali. La compilazione è stata stimata in 20 minuti, ed è stata ottimizzata per l'utilizzo su dispositivi desktop e mobile, al fine di facilitare l'accesso da parte dei rispondenti.

3.3 Target di riferimento e modalità di somministrazione

L'indagine ha avuto come target di riferimento le aziende italiane attive nei settori potenzialmente interessati all'adozione dei Digital Twin, con particolare attenzione a comparti già coinvolti nei processi di digitalizzazione e innovazione legati all'Industria 4.0.

Tra i settori specifici presi in considerazione si segnalano la logistica e trasporti, l'ambito manifatturiero, l'energia e le utilities, le costruzioni e le infrastrutture, la sanità e il biomedicale, i servizi ICT e la consulenza tecnologica, e infine l'agricoltura intelligente e la catena di approvvigionamento agroalimentare.

L'obiettivo era quello di ottenere una mappatura trasversale della conoscenza e dell'utilizzo dei Digital Twin, sia da parte di imprese già digitalmente avanzate sia da realtà in fase esplorativa.

3.3.1 Strategie di selezione del campione

Per l'individuazione delle imprese potenzialmente rilevanti ai fini dell'indagine, è stato utilizzato il database AIDA (Analisi Informatizzata Delle Aziende), nella versione aggiornata (release 339, software v.105). La selezione è stata effettuata utilizzando due diverse strategie di selezione multicriteri, impostate come segue:

1. Prima strategia di selezione: PMI manifatturiere (51–250 dipendenti)

La prima ricerca ha avuto l'obiettivo di individuare imprese di medie dimensioni (51–250 dipendenti) nei settori industriali potenzialmente più esposti all'adozione dei Digital Twin. I criteri applicati sono stati:

- Data di costituzione: aziende fondate tra il 2005 e il 2025;
- Presenza di sito web e numero di telefono (come indicatori di digitalizzazione e contattabilità);
- Codici ATECO riportati in tabella 13, coerenti con la manifattura innovativa (industria alimentare, tessile, meccanica, elettronica, chimica, automotive, ecc.);
- Dipendenti: tra 51 e 250;

Questa ricerca ha prodotto una lista di 1.447 imprese target, contattate per la somministrazione del questionario.

2. Seconda strategia: Grandi imprese e PMI innovative

La seconda ricerca ha mirato a integrare il campione con grandi aziende e PMI innovative iscritte nell'apposito registro, considerate particolarmente rilevanti per l'adozione di tecnologie abilitanti. I criteri utilizzati sono stati:

- Data di costituzione: dal 2000 in poi;
- Codici ATECO riportati in tabella 13 manifatturieri ad alta intensità tecnologica;
- Presenza di sito web, numero di telefono e classificazione come PMI innovativa

- Dipendenti: almeno 250 (per almeno un anno negli ultimi dieci);

Questa seconda strategia ha restituito un ulteriore bacino di 285 imprese.

Codice ATECO	Descrizione del settore
10	Industrie alimentari
11	Industria delle bevande
12	Industria del tabacco
13	Industrie tessili
14	Confezione di articoli di abbigliamento
15	Fabbricazione di articoli in pelle e simili
16	Industria del legno e dei prodotti in legno e sughero (esclusi mobili)
17	Fabbricazione di carta e di prodotti di carta
18	Stampa e riproduzione di supporti registrati
19	Raffinazione del petrolio e derivati
20	Fabbricazione di prodotti chimici
21	Fabbricazione di prodotti farmaceutici
22	Fabbricazione di articoli in gomma e materie plastiche
23	Prodotti della lavorazione di minerali non metalliferi
24	Metallurgia
25	Fabbricazione di prodotti in metallo (esclusi macchinari)
26	Elettronica, ottica, apparecchi elettromedicali e strumenti
27	Apparecchiature elettriche ed elettroniche per uso domestico
28	Fabbricazione di macchinari ed apparecchiature n.c.a.
29	Fabbricazione di autoveicoli, rimorchi e semirimorchi
30	Fabbricazione di altri mezzi di trasporto
31	Fabbricazione di mobili
32	Altre industrie manifatturiere

Tabella 13. Codici ATECO utilizzati per estrazione aziende

3.3.2 Modalità di somministrazione

Il questionario è stato diffuso in modalità online, attraverso la piattaforma Google Forms, nel periodo maggio–luglio 2025. Per massimizzare il numero e la varietà delle risposte, è stata adottata una strategia mista di diffusione che ha utilizzato contatti diretti con aziende selezionate tramite e-mail, LinkedIn e reti professionali;

La partecipazione è stata completamente volontaria e anonima, garantendo il rispetto della privacy e l'utilizzo dei dati esclusivamente a fini di ricerca e con garanzia di riservatezza nel trattamento dei dati secondo la normativa vigente (GDPR).

3.3.3 Criteri di inclusione e validazione del campione

Sono stati considerati validi solo i questionari:

- compilati per oltre l'80% del contenuto;
- compilati da soggetti dichiaratamente coinvolti in ruoli di responsabilità aziendale o con conoscenza del tema (es. CEO, CTO, Innovation Manager, responsabili operations o IT).

Le risposte parziali, incongruenti o duplicate sono state escluse nella fase di pulizia dei dati.

3.4 Campione rispondente: descrizione e caratteristiche

L'indagine ha raccolto un totale di 25 risposte valide, provenienti da aziende italiane operanti in diversi comparti produttivi, con un buon grado di eterogeneità in termini di settori, dimensione e ruolo dei rispondenti. Il campione è coerente con i criteri di selezione adottati attraverso il database AIDA, garantendo pertinenza rispetto all'oggetto dell'indagine: la conoscenza, l'implementazione e l'utilizzo dei Digital Twin nel contesto dell'Industria 4.0.

3.4.1 Settore di appartenenza

Le aziende rispondenti, come si vede in figura 11, risultano distribuite su una molteplicità di settori industriali.

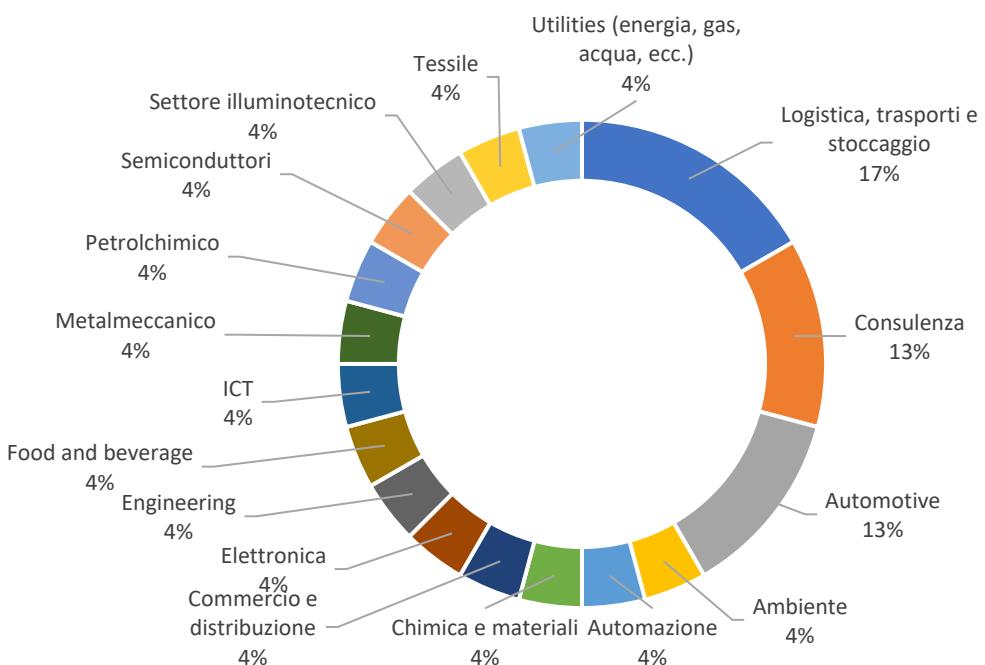


Figura 11. Distribuzione per settore di appartenenza

Questa varietà riflette la trasversalità dell'interesse verso i Digital Twin, i cui ambiti di applicazione si estendono dalla progettazione alla manutenzione predittiva, dalla logistica alla produzione personalizzata.

3.4.2 Dimensione aziendale

In termini di dimensione, il campione è composto in larga parte da:

- Piccole e medie imprese (PMI), in particolare nella fascia 51–250 dipendenti;
- Grandi imprese (oltre 250 dipendenti), selezionate tramite criteri anagrafici e dimensionali ricavati da AIDA.

La presenza di PMI e imprese strutturate consente di osservare il grado di diffusione dei DT in contesti con risorse e capacità tecnologiche differenti.

3.4.3 Ruolo del rispondente

I questionari sono stati compilati da figure aziendali qualificate, prevalentemente con responsabilità direzionali e tecnico-strategiche. Tra i ruoli più frequenti figurano:

- Amministratori delegati (CEO);
- Chief Operating Officer (COO);
- Direttori Generali, Logistici e Commerciali;
- Project, Sales e Sustainability manager;
- IT manager e direttori tecnici.

La qualità e la seniority del rispondente garantiscono una affidabilità elevata delle risposte, offrendo uno sguardo autorevole sulle dinamiche decisionali legate all'adozione dei Digital Twin.

3.5 Strumenti di analisi dei dati

Per l'elaborazione dei dati raccolti tramite il questionario, sono stati impiegati strumenti di analisi statistica descrittiva, orientati a fornire una rappresentazione chiara e sintetica delle tendenze emergenti. L'obiettivo è stato duplice: da un lato fotografare lo stato attuale della conoscenza e diffusione dei Digital Twin tra le aziende italiane; dall'altro identificare pattern significativi rispetto a dimensioni come settore, dimensione aziendale, area di attività e ruolo decisionale del rispondente.

3.5.1 Software utilizzati

L'analisi dei dati è stata effettuata utilizzando due strumenti principali.

Microsoft Excel è stato impiegato per la pulizia del *dataset*, la gestione delle risposte e la generazione di tabelle di frequenza e dei grafici.

Google Forms, invece, ha funzionato come piattaforma di raccolta, da cui è stato successivamente esportato il *dataset* nel formato .xlsx.

Questi strumenti hanno permesso di garantire sia l'accuratezza dell'elaborazione statistica, sia la riproducibilità dei risultati.

3.5.2 Tipologie di analisi svolte

L'analisi ha riguardato principalmente dati categorici e ordinali, per i quali sono state calcolate le distribuzioni di frequenza assolute e percentuali per ogni variabile, come il settore, il ruolo o la conoscenza dei Digital Twin.

Sono stati inoltre effettuati incroci tra variabili chiave, ad esempio l'adozione dei Digital Twin per settore o per dimensione aziendale. Infine, è stata condotta un'analisi qualitativa delle risposte aperte, tramite lettura tematica e classificazione sintetica.

Ove opportuno, le informazioni sono state rappresentate visivamente tramite tabelle, grafici a barre e grafici a torta, al fine di migliorare la leggibilità dei risultati nel Capitolo 4.

3.5.3 Validazione e trattamento dei dati

Sono state considerate valide ai fini dell'analisi esclusivamente le risposte che fossero complete per almeno l'80% del questionario e che fossero fornite da figure aziendali qualificate, in base ai criteri specifici descritti nel paragrafo 3.4.

I dati sono stati trattati in forma aggregata e anonima, in conformità con la normativa vigente in materia di privacy (Regolamento UE 2016/679 – GDPR).

4. RISULTATI DELL'INDAGINE

4.1 Profilo delle aziende rispondenti

L'analisi del profilo delle aziende rispondenti consente di delineare le principali caratteristiche del campione oggetto di indagine, offrendo un quadro di riferimento utile per interpretare le successive analisi su conoscenza, adozione e prospettive dei Digital Twin. I dati considerano quattro dimensioni principali: settore di appartenenza, ambito di attività, dimensione aziendale e ruolo del rispondente.

4.1.1 Settore di appartenenza

Come mostrato nel grafico 1, le aziende coinvolte nell'indagine provengono da una varietà di settori produttivi. I compatti più rappresentati sono:

- Logistica, trasporti e stoccaggio,
- Automotive,
- ICT e consulenza tecnologica,

Questa distribuzione riflette la rilevanza del tema dei Digital Twin in settori ad alta intensità tecnologica, dove la virtualizzazione dei processi può generare valore in termini di efficienza, qualità e personalizzazione.

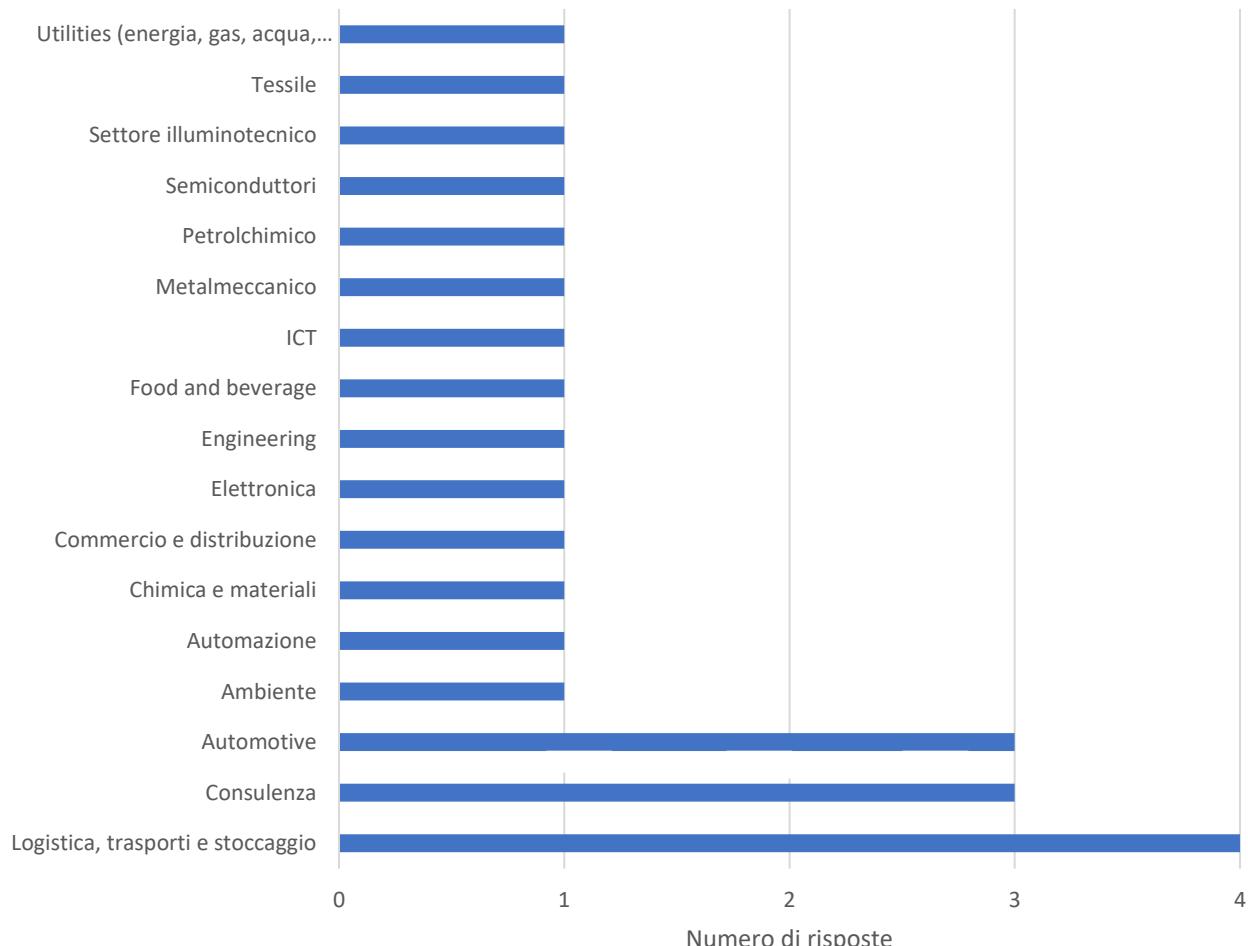


Grafico 1. Distribuzione per settore di appartenenza

4.1.2 Ambito di attività

Il grafico 2 evidenzia come la maggioranza delle aziende operi nell'ambito dei servizi e della produzione manifatturiera. Seguono le altre attività quali: network as a service, la progettazione e la gestione dei dati. Questa varietà conferma la trasversalità delle tecnologie Digital Twin, la cui applicabilità non è circoscritta solo alla fabbrica, ma interessa l'intera catena del valore.

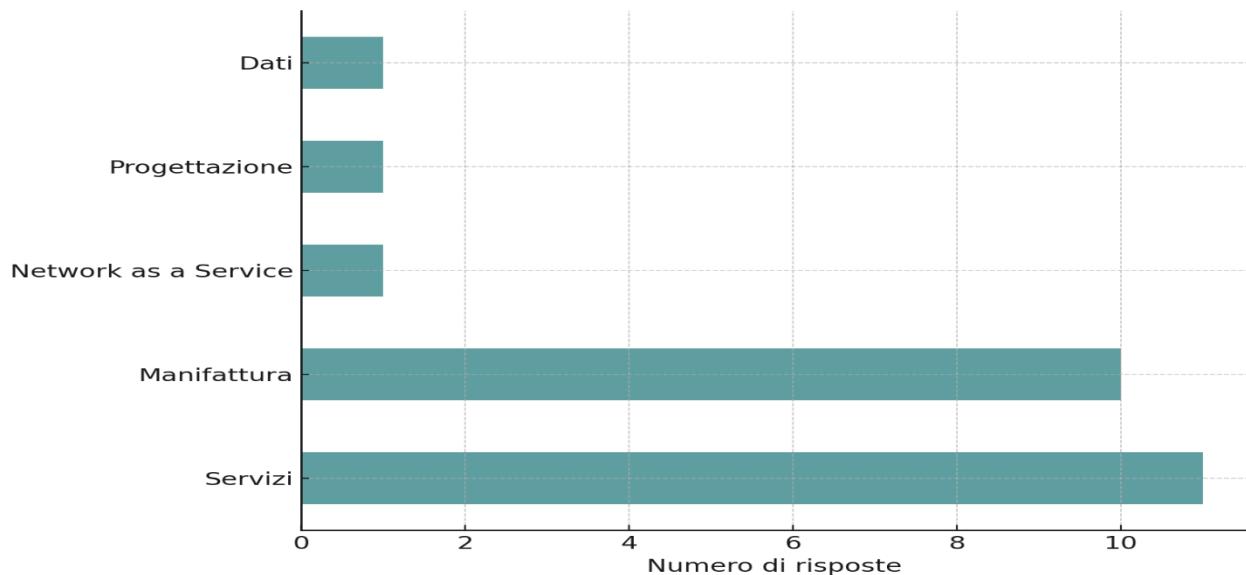


Grafico 2. Distribuzione per ambito di attività

4.1.3 Dimensione aziendale

Come riportato nel grafico 3, la distribuzione della dimensione delle aziende rispondenti per numero di dipendenti mostra una prevalenza di Grandi Imprese (40%) e a seguire Piccole e Medie Imprese (PMI) con il 24% delle risposte per ciascuna categoria, coerente con i criteri adottati nella fase di selezione tramite il database AIDA. Marginale risulta essere la presenza delle Microimprese (12%). Tale distribuzione consente un confronto significativo tra modelli organizzativi e risorse tecnologiche disponibili.

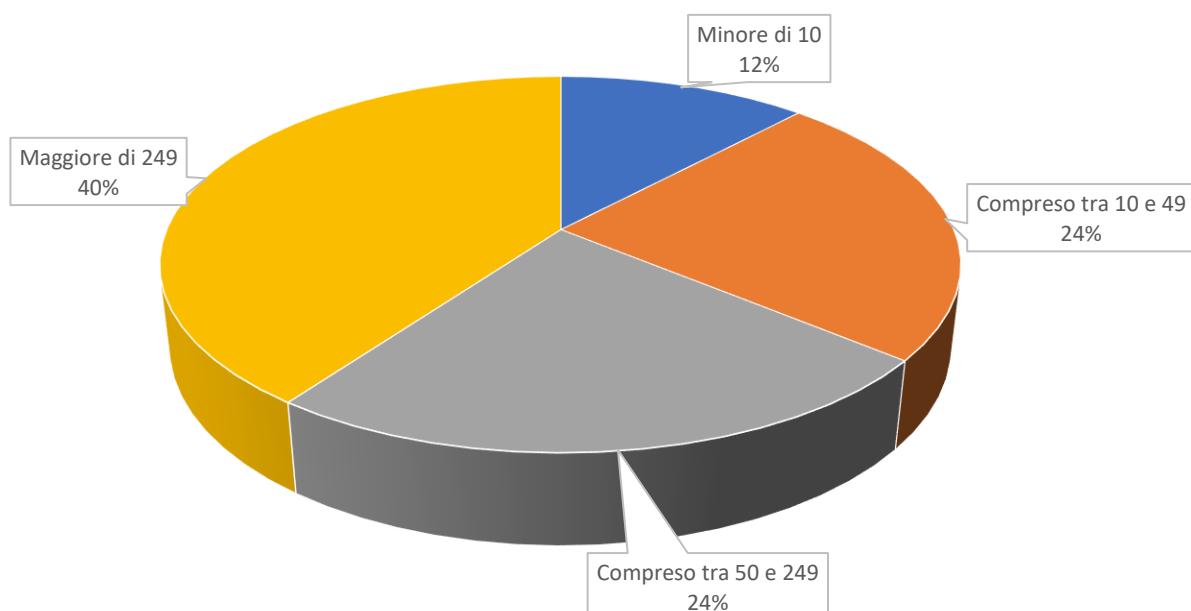


Grafico 3. Distribuzione per dimensione aziendale

4.1.4 Ruolo del rispondente

I profili più rappresentati includono: Amministratori delegati (CEO) e manager generali, Responsabili tecnici e Operations Manager, Innovation Manager e IT Manager.

La qualificazione professionale dei rispondenti garantisce un elevato grado di affidabilità delle informazioni raccolte, poiché i partecipanti sono in posizione di valutare l'effettiva implementabilità e il valore strategico dei Digital Twin all'interno delle loro organizzazioni.

4.1.5 Fatturato aziendale

La distribuzione per fatturato annuo, come mostrato nel grafico 4, evidenzia la prevalenza di imprese appartenenti a fasce di ricavi maggiore di 50 milioni di euro, con una significativa presenza nella fascia 2–50 milioni, coerente con la tipologia delle PMI selezionate tramite database AIDA. Tale configurazione suggerisce che l'interesse verso i Digital Twin non è limitato alle grandi imprese, ma coinvolge anche aziende con capacità economiche intermedie, potenzialmente più agili nell'adottare soluzioni innovative purché supportate da incentivi e competenze.

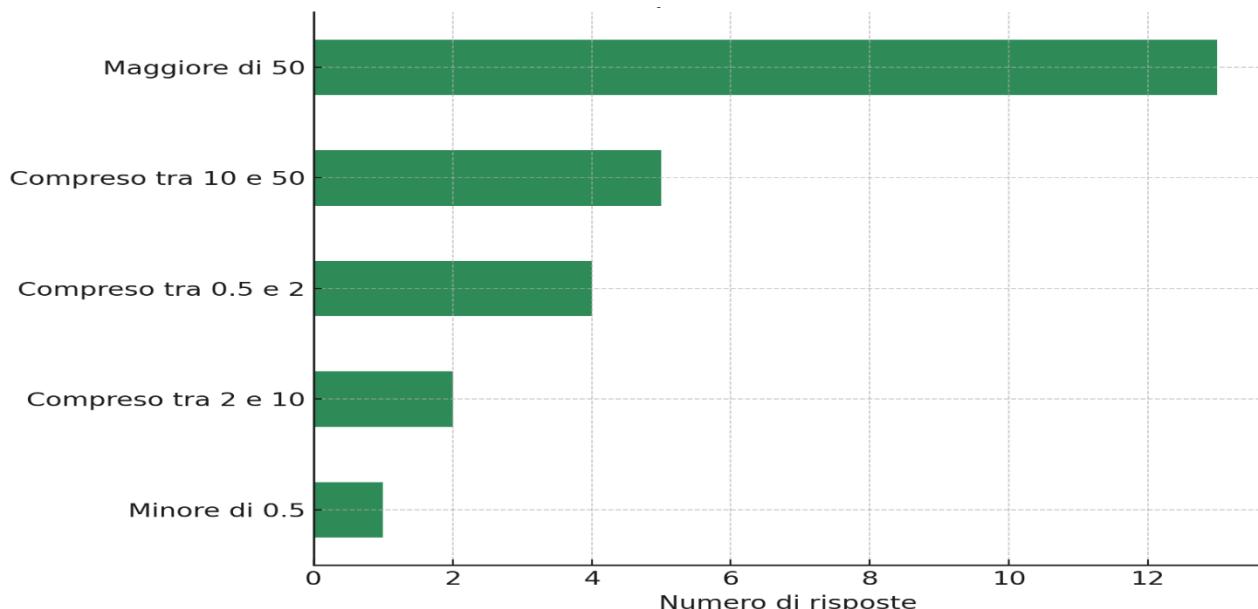


Grafico 4. Distribuzione per fascia di Fatturato annuo in milioni di euro

4.1.6 Mercati serviti

Come illustrato nel grafico 5, una parte consistente delle aziende rispondenti (72%) opera su mercati internazionali, sia europei che extraeuropei, oltre a quello nazionale. Solo una quota minoritaria (28%) è attiva esclusivamente nel mercato italiano.

Questi dati confermano una vocazione all'internazionalizzazione che caratterizza molte imprese manifatturiere italiane, soprattutto quelle medio-grandi, come confermato anche da recenti rapporti sull'export industriale italiano [165]. La presenza nei mercati esteri rappresenta per queste aziende non solo un'opportunità di crescita, ma anche una spinta all'adozione di tecnologie digitali avanzate, al fine di rimanere competitive in contesti ad alto tasso di innovazione.

In questo contesto, tecnologie come i Digital Twin si configurano come strumenti strategici per garantire efficienza operativa, adattabilità e gestione predittiva, particolarmente rilevanti quando si opera in supply chain globali complesse [166].

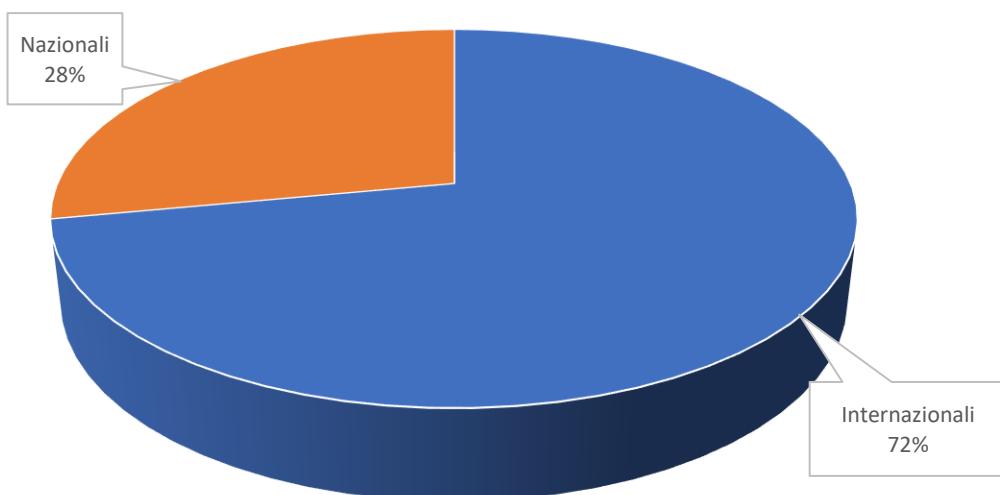


Grafico 5. Mercati serviti

4.1.7 Anno di fondazione

La maggior parte delle aziende rispondenti è stata fondata tra gli anni 2000 e 2020, con picchi tra il 2005 e il 2015. Questo suggerisce una forte presenza di imprese relativamente giovani, che potrebbero avere una maggiore propensione all'adozione di tecnologie digitali per il proprio sviluppo competitivo.

Al tempo stesso, sono presenti anche aziende fondate prima degli anni 2000, a testimonianza della partecipazione all'indagine da parte di organizzazioni consolidate che, pur avendo una struttura più tradizionale, si interessano alle opportunità offerte dalla trasformazione digitale.

4.1.8 Modalità di vendita

Le aziende rispondenti si distribuiscono tra vendita diretta (60%) e produzione su commessa (40%). La produzione su commessa implica una maggiore personalizzazione dei processi e dei prodotti, aspetto che rende particolarmente interessante l'adozione di strumenti di modellazione digitale e simulazione come i Digital Twin.

Questa configurazione suggerisce un contesto produttivo articolato, in cui flessibilità, adattabilità e gestione avanzata dei dati rappresentano elementi strategici per il successo competitivo.

4.1.9 Presenza di fornitori principali

Una quota significativa delle aziende rispondenti (64%) dipende da uno o più fornitori principali, che coprono almeno il 30% del fabbisogno di materie prime o semilavorati. Questa concentrazione della supply chain suggerisce una vulnerabilità potenziale alle interruzioni di fornitura o variazioni dei prezzi, ma al contempo un rapporto consolidato con i partner strategici.

La presenza di fornitori principali può influenzare anche l'adozione di tecnologie digitali collaborative, come i Digital Twin condivisi tra cliente e fornitore per ottimizzare i flussi.

4.1.10 Numero di fornitori principali

Come si vede nel grafico 6 la maggioranza relativa delle aziende (56%) dichiara di avere più di 20 fornitori principali, indicando una rete di approvvigionamento ampia e probabilmente diversificata, tipica di settori complessi o con filiere articolate.

Un 22% ha un numero medio di fornitori (4–10), segno di una filiera moderatamente diversificata, probabilmente bilanciata tra stabilità dei rapporti e flessibilità.

Solo il 13% ha da 1 a 3 fornitori principali, situazione che potrebbe indicare forte dipendenza da pochi partner strategici, con rischi di approvvigionamento ma anche potenziali vantaggi in termini di relazioni consolidate.

Le aziende con 11–20 fornitori (9%) si collocano in una fascia intermedia, che può rappresentare un equilibrio tra specializzazione e diversificazione.

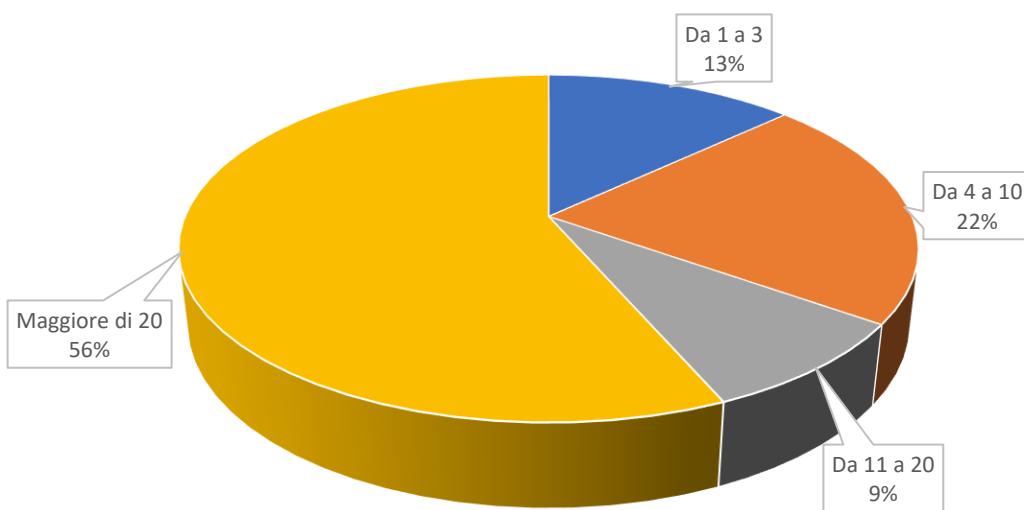


Grafico 6. Numero di fornitori principali dichiarati dalle aziende

4.1.11 Concentrazione del fatturato sui clienti più importanti

Il grafico 7 evidenzia che una porzione significativa delle aziende rispondenti concentra oltre il 30% del proprio fatturato su una ristretta base di clienti principali. In diversi casi, questa percentuale supera il 75%, indicando una forte esposizione economica verso pochi attori della domanda.

Questa situazione riflette modelli di business B2B verticalizzati, nei quali è fondamentale garantire livelli elevati di servizio e affidabilità. Secondo Porter [167], un'elevata dipendenza da clienti chiave incrementa il loro potere contrattuale, con potenziali effetti sulla redditività e sulla flessibilità aziendale. Allo stesso tempo, tale configurazione giustifica l'adozione di strumenti digitali come i Digital Twin collaborativi, capaci di abilitare simulazioni condivise e una più efficace gestione dei processi integrati [168].

Anche secondo il modello strategico proposto da Kraljic [169], i clienti che rappresentano una quota rilevante del fatturato dovrebbero essere gestiti attraverso soluzioni tecnologiche avanzate che supportino il controllo della variabilità, la trasparenza e la previsione dei fabbisogni.

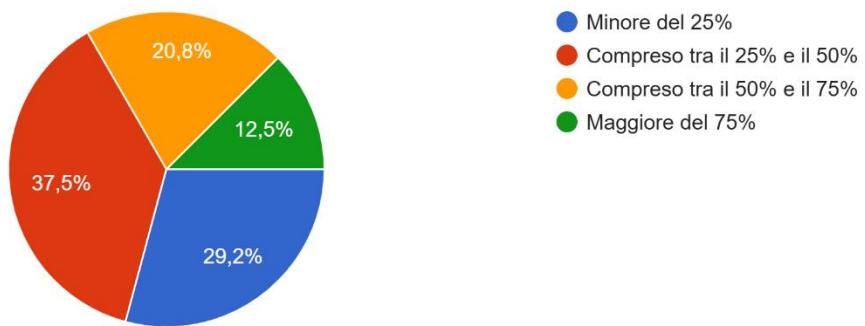


Grafico 7. Percentuale di fatturato generata dai clienti principali

4.1.12 Settore di mercato in cui opera il cliente principale

La maggior parte delle aziende rispondenti indica come cliente principale una grande impresa. Questa predominanza (68%) suggerisce che molte aziende del campione sono fornitori in filiere strutturate, dove il cliente principale ha una posizione di rilievo nel mercato e può influenzare significativamente la gestione operativa del fornitore.

Un numero minore di aziende lavora prevalentemente con PMI (16%) o con soggetti operanti nella vendita al dettaglio (16%), indicando la presenza nel campione anche di relazioni più orizzontali o orientate al consumatore finale.

In sintesi, la configurazione evidenzia un campione in cui i clienti principali sono, in larga parte, attori di grandi dimensioni, coerenti con contesti produttivi complessi e potenzialmente più digitalizzati.

4.1.13 Quota di mercato detenuta (Italia)

Come mostrato nel grafico 8 la maggior parte delle aziende del campione detiene una quota di mercato nazionale inferiore al 10%. Solo una percentuale limitata di imprese supera soglie più alte (oltre il 20%), mentre le quote superiori al 50% sono detenute dal 17% delle aziende rispondenti.

Questi risultati indicano una struttura di mercato frammentata, tipica di settori caratterizzati da forte concorrenza e presenza di molteplici operatori di piccole e medie dimensioni.

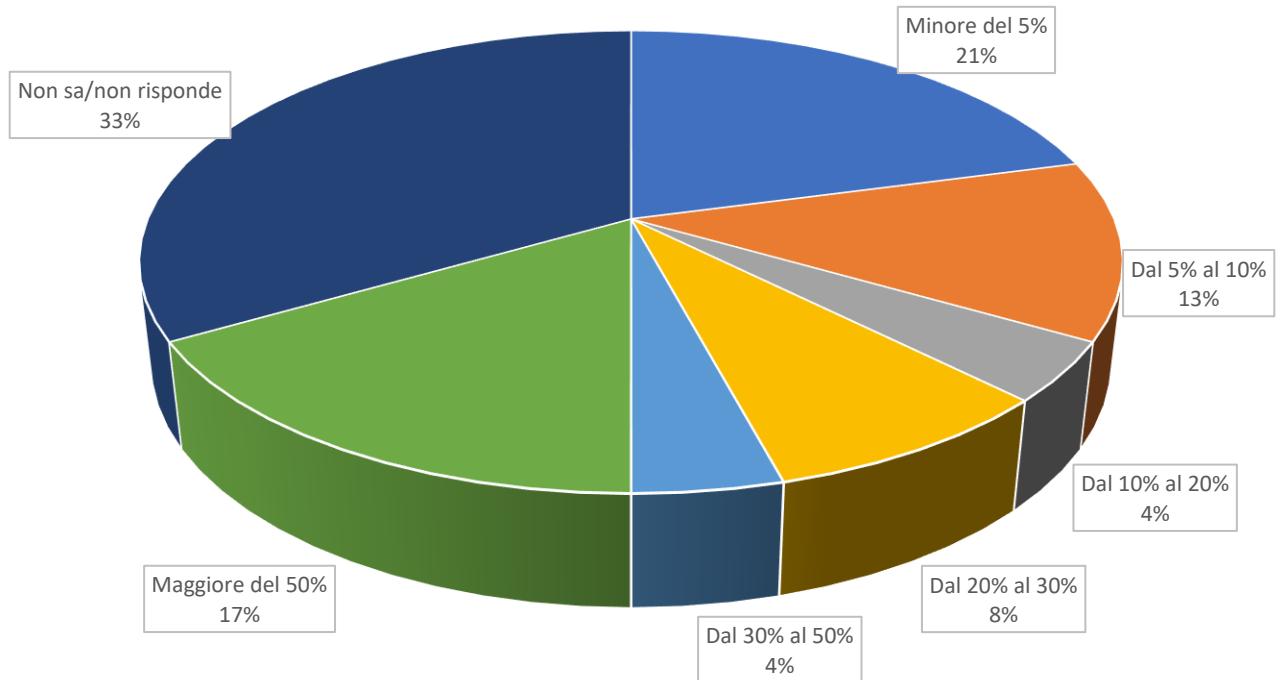


Grafico 8. Quota di mercato detenuta dall'Azienda a livello nazionale

4.1.14 Stagionalità o fluttuazioni della domanda

Il grafico 9 mostra che una parte significativa delle aziende segnala la presenza di fluttuazioni stagionali o picchi di domanda nei propri ordini. Ciò implica una necessità ricorrente di gestire carichi produttivi variabili e, in alcuni casi, programmare capacità e risorse con maggiore flessibilità.

Questa variabilità può rappresentare un elemento critico nella gestione operativa, potenzialmente affrontabile attraverso strumenti di simulazione dinamica, previsione e pianificazione avanzata, tecnologie per le quali i Digital Twin offrono funzionalità particolarmente utili.

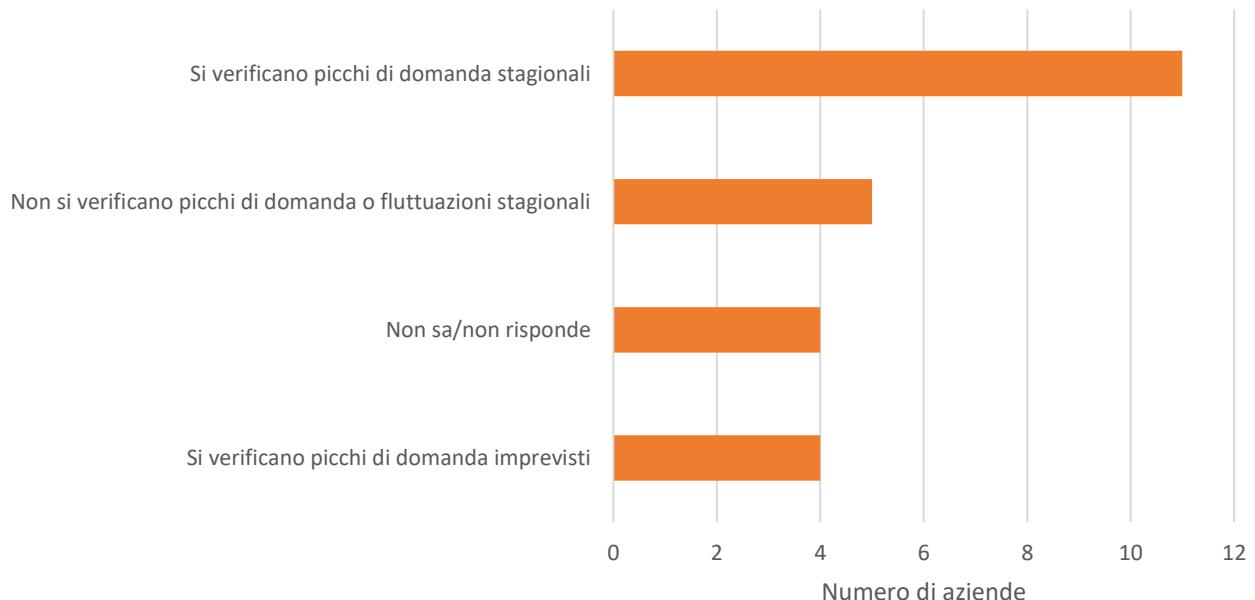


Grafico 9. Presenza di stagionalità o picchi negli ordini

4.1.15 Strategie per la gestione di picchi e fluttuazioni stagionali

Il grafico 10 mostra che la strategia più frequentemente adottata dalle aziende per affrontare periodi di sovraccarico produttivo è l'aumento della capacità interna, attraverso il ricorso a straordinari, ampliamento dei turni o estensione temporanea dell'orario di lavoro.

Seguono, in ordine di frequenza:

- l'utilizzo di margini interni di capacità produttiva disponibili,
- il ricorso all'esternalizzazione (outsourcing),

il 25% dei rispondenti ha dichiarato di non adottare alcuna strategia definita o di non essere in grado di fornire una risposta. Complessivamente, il quadro restituisce una gestione dei picchi ancora prevalentemente tattica, basata su leve operative tradizionali.

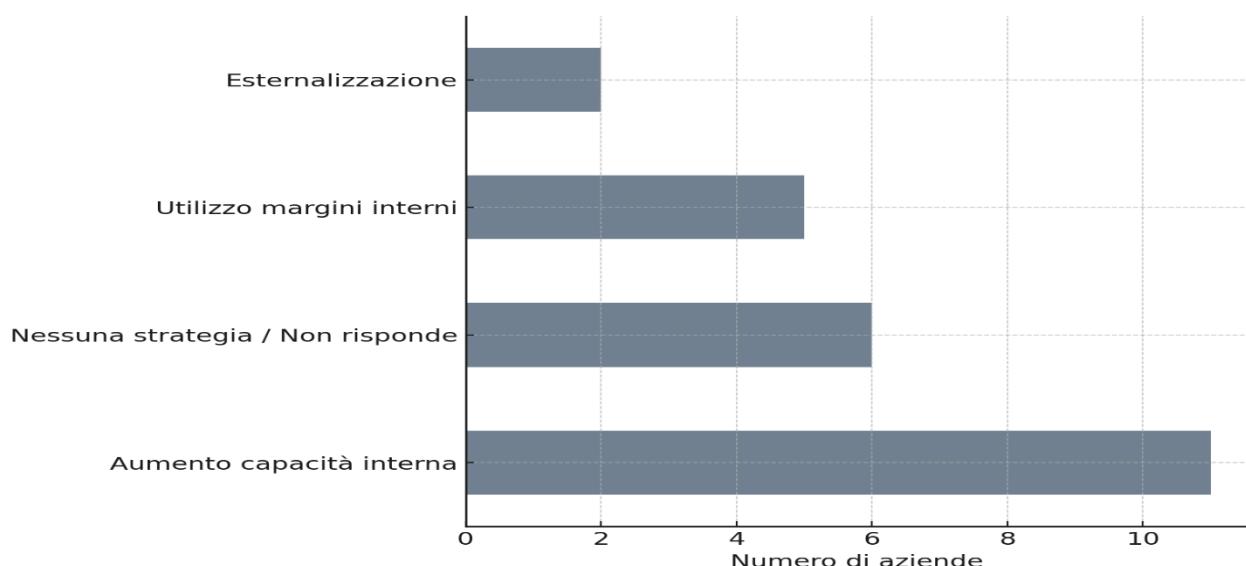


Grafico 10. Strategie per gestire picchi o stagionalità

4.1.16 Partecipazione a iniziative per l'innovazione

Una quota significativa di aziende (70,8%) ha partecipato a bandi, progetti o finanziamenti finalizzati allo sviluppo tecnologico e all'innovazione. Tale dato indica una buona propensione all'interazione con strumenti pubblici o collaborativi di sostegno all'innovazione, potenzialmente rilevante anche per la futura adozione di tecnologie come i Digital Twin.

4.1.17 Conclusioni

L'analisi delle risposte relative al profilo delle aziende partecipanti all'indagine restituisce un quadro coerente con la composizione del tessuto produttivo italiano, con una prevalenza di piccole e medie imprese, attive in settori ad alta intensità tecnologica e connessi a filiere strutturate.

La maggior parte delle aziende intervistate presenta le seguenti caratteristiche:

- Appartenenza a settori industriali diversificati, in particolare Logistica, trasporti e stoccaggio, Automotive, ICT e consulenza;
- Dimensioni comprese tra 51 e 250 dipendenti, con un fatturato distribuito principalmente tra i 2 e i 50 milioni di euro;
- Clienti principali classificabili come grandi imprese, operanti in contesti strutturati;

- Presenza su mercati internazionali, accanto a quello nazionale;
- Modelli operativi misti, con un buon equilibrio tra produzione su commessa e vendita diretta;
- Una quota significativa del fatturato concentrata su pochi clienti chiave, spesso superiori al 30%;
- Dipendenza da un numero ristretto di fornitori principali, che rende centrale il coordinamento di filiera;
- Una parte rilevante del campione dichiara di affrontare fluttuazioni stagionali o picchi produttivi, gestiti principalmente tramite aumento della capacità interna;
- Infine, una buona parte delle aziende ha partecipato a iniziative per lo sviluppo tecnologico e l'innovazione, segnalando apertura verso processi evolutivi.

Nel complesso, il profilo del campione analizzato offre una base solida e coerente per interpretare le risposte alle sezioni successive dell'indagine, dedicate alla conoscenza e all'implementazione delle tecnologie digitali e, in particolare, dei Digital Twin.

4.2 Livello di conoscenza del paradigma Industria 4.0

La totalità delle aziende rispondenti ha dichiarato di conoscere il concetto di Industria 4.0. Questo risultato conferma che il paradigma 4.0 è ormai diffusamente noto nel contesto industriale italiano, almeno a livello informativo, anche tra imprese di dimensioni medie.

Il grafico 11 mostra le fonti più citate per l'acquisizione di conoscenza del concetto di Industria 4.0.

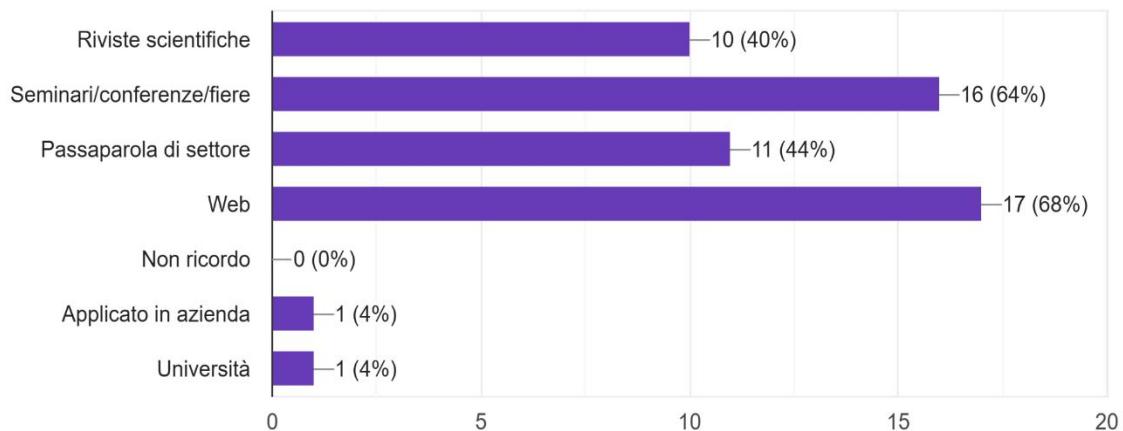


Grafico 11. Fonti informative per il concetto di industria 4.0

Questi dati suggeriscono che la conoscenza del paradigma 4.0 è stata trasmessa attraverso canali sia formali che informali, con una significativa incidenza di occasioni di confronto diretto (seminari, conferenze e fiere). Le riviste scientifiche mantengono un ruolo abbastanza importante così come occorre menzionare il passaparola tra operatori del settore.

4.2.1 Conoscenza delle tecnologie

L'analisi aggregata, come illustrato nel grafico 12, evidenzia che le tecnologie più conosciute e diffuse sono: Internet of Things. Cloud Computing e Sensori Smart

Le tecnologie con il più alto numero di livello di conoscenza "molto basso" e "basso" includono: Sistemi Cyberfisici (CPS Cyber Physical System) e Sistemi di sicurezza cibernetica (CSS CyberSecurity System) e in parte Stampa 3D.

L'intelligenza artificiale e la Robotica si collocano a metà, con buona conoscenza ma anche una porzione significativa di aziende che dichiara livelli bassi.

Il quadro complessivo mostra una discreta consapevolezza delle tecnologie digitali consolidate, ma anche lacune nei confronti di soluzioni emergenti o più complesse dal punto di vista tecnico.

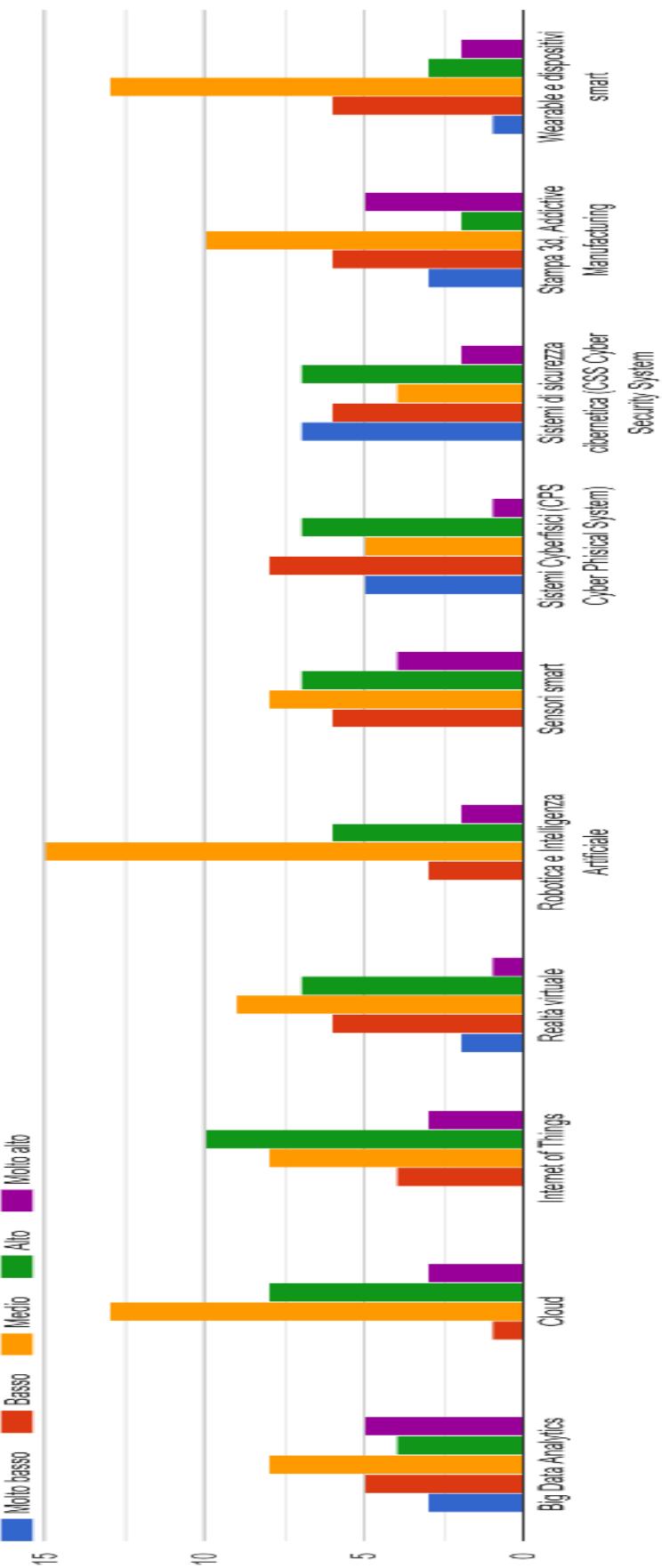


Grafico 12. Conoscenza delle tecnologie industria 4.0

4.2.2 Conoscenza di bandi e finanziamenti per lo sviluppo tecnologico e l'Industria 4.0.

Il 56% delle aziende rispondenti ha dichiarato di essere a conoscenza dell'esistenza di bandi e finanziamenti pubblici destinati a sostenere l'adozione delle tecnologie dell'Industria 4.0.

Questo risultato evidenzia una buona base informativa nel campione esaminato. La conoscenza di strumenti di finanziamento rappresenta un prerequisito favorevole per l'accesso a incentivi e per l'eventuale adozione di soluzioni innovative, soprattutto in ambiti complessi come l'integrazione dei Digital Twin.

4.2.3 Di quali bandi/finanziamenti è a conoscenza?

Come si vede dal grafico 13 le risposte aperte evidenziano che, tra le aziende che hanno dichiarato di conoscere bandi e finanziamenti i più citati sono i bandi MIMIT (ex MISE), spesso legati al piano Investimenti 4.0. Seguono i riferimenti al PNRR, in particolare ai fondi per la transizione digitale. Altri strumenti menzionati includono Fondoimpresa, Transizione Digitale e bandi regionali.

Il dato mostra un certo grado di consapevolezza ma anche confusione o conoscenza parziale, con riferimenti generici come "Industria 4.0" o "leggi precedenti", indice di una conoscenza non sempre strutturata dei meccanismi di supporto pubblico.

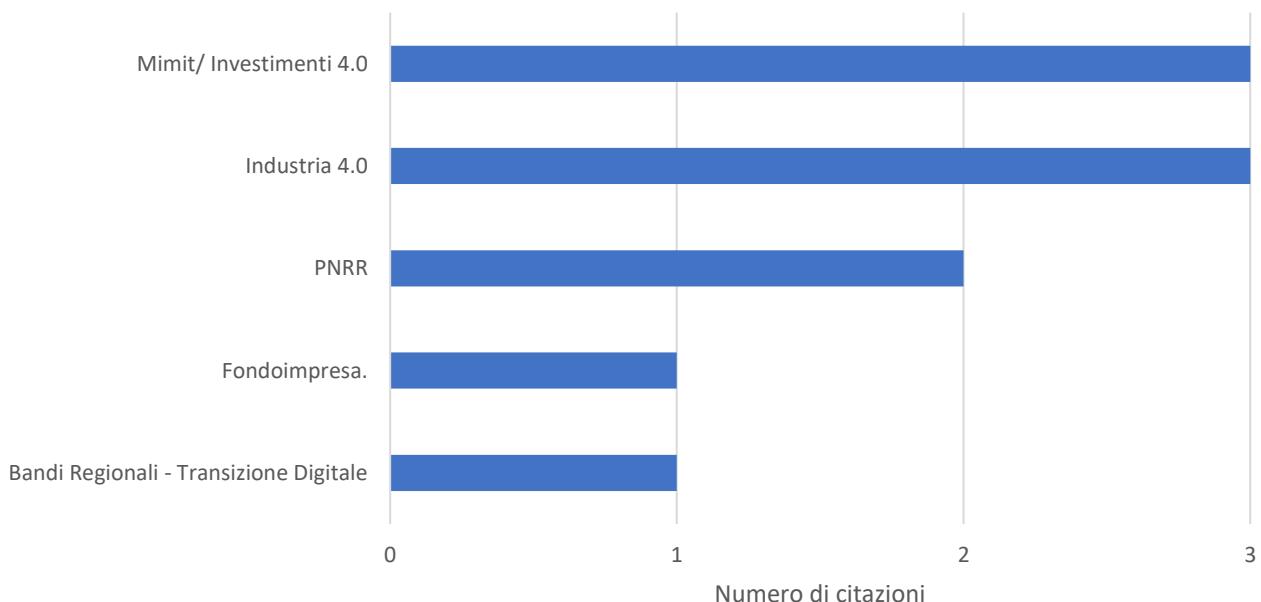


Grafico 13. Bandi o strumenti di finanziamento conosciuti

Solo il 12,5% delle aziende rispondenti ha effettivamente usufruito degli incentivi previsti dalla legge Calenda o dalla Nuova Sabatini, mentre la restante parte non ne ha beneficiato.

Questo risultato suggerisce che, sebbene esista una certa conoscenza degli strumenti di supporto (il 56% delle aziende rispondenti), non tutte le aziende riescono a tradurla in accesso concreto agli incentivi. Le ragioni possono essere diverse: requisiti soggettivi, complessità procedurali o mancanza di assistenza adeguata.

4.2.4 Conoscenza delle normative europee sulla gestione dei dati (GDPR)

La grande maggioranza delle aziende rispondenti (80%) dichiara di conoscere il regolamento europeo GDPR (General Data Protection Regulation) [170] in materia di protezione dei dati.

Questa ampia consapevolezza può essere attribuita all'obbligatorietà della norma per tutte le imprese che trattano dati personali, nonché alla diffusione di attività informative e di adeguamento svolte negli ultimi anni. Il dato indica quindi un buon livello di allineamento normativo di base, che costituisce un presupposto fondamentale anche per l'adozione responsabile di tecnologie digitali evolute.

4.2.5 Azione attuate o da attuare per adeguarsi alla normativa

Come mostrato dalla tabella 14 emerge che le azioni più frequentemente adottate o pianificate per l'adeguamento alla normativa GDPR sono:

- Fornire strumenti di consenso aggiornati con le nuove normative;
- Informare l'utente/cliente riguardo alle finalità del trattamento dei suoi dati personali e la profilazione alla quale sarà soggetto;
- Monitorare costantemente la gestione degli accessi e i permessi ai dati.

A seguire:

- Garantire un alto livello di protezione e sicurezza per i dati che varcano i confini nazionali;
- Gestire un archivio di dati sensibili (carte di credito, informazioni sulla salute) in un luogo molto sicuro.

Ed infine:

- Assumere un DPO (Data Protection Officer, responsabile dati).

Il dato evidenzia un discreto livello di reattività normativa, con prevalenza per le azioni obbligatorie (informazione e consenso), ma anche segnali di approcci più strutturati come la formazione interna e la governance della protezione dei dati.

Azione attuate per adeguarsi alla normativa GDPR	Ranking
Fornire strumenti di consenso aggiornati con le nuove normative	1
Informare l'utente/cliente riguardo alle finalità del trattamento dei suoi dati personali e la profilazione alla quale sarà soggetto	1
Monitorare costantemente la gestione degli accessi e i permessi ai dati	1
Garantire un alto livello di protezione e sicurezza per i dati che varcano i confini nazionali	2
Gestire un archivio di dati sensibili (carte di credito, informazioni sulla salute) in un luogo molto sicuro	3
Assumere un DPO (Data Protection Officer, responsabile dati)	4

Tabella 14. Azioni attuate per adeguarsi alla normativa GDPR

4.2.6 Disponibilità a permettere l'accesso ai dati aziendali da parte di servizi esterni

Come mostrato nel grafico14 una fetta rilevante di aziende (62,5%) è aperta alla possibilità di condividere dati aziendali con servizi esterni, nel contesto di soluzioni 4.0. Tuttavia, permangono esitazioni e una quota significativa di rispondenti (37,5%) è contraria.

Questa polarizzazione riflette un equilibrio tra apertura all'innovazione e cautela verso la protezione dei dati: le aziende riconoscono il valore dei dati per servizi esterni (es. manutenzione predittiva, analisi cloud), ma esprimono preoccupazioni legate alla sicurezza, controllo e proprietà delle informazioni.

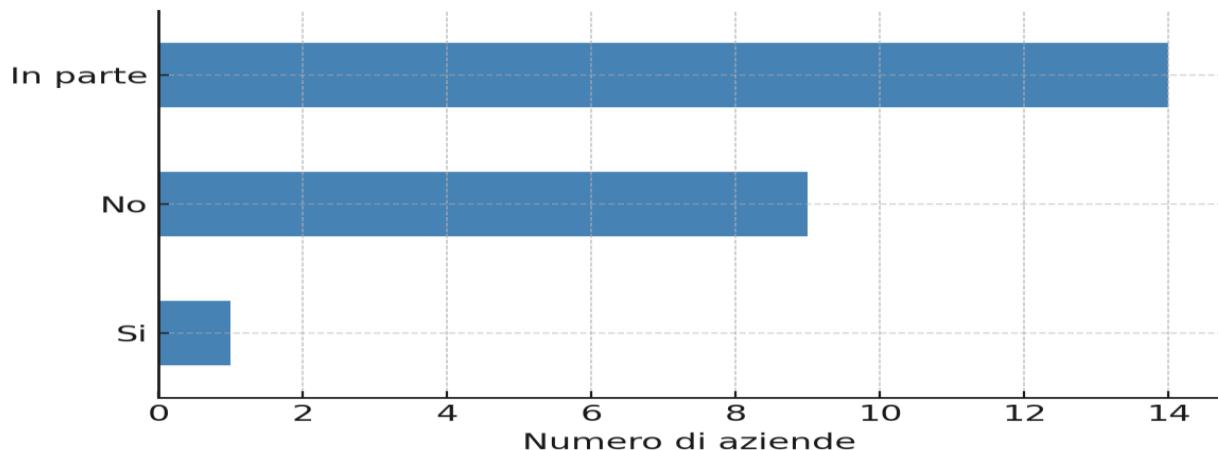


Grafico 14. Disponibilità a condividere i dati con esterno

L'analisi delle motivazioni delle aziende contrarie, come evidenziato nel grafico 15, mostra che la principale resistenza alla condivisione dei dati è legata alla percezione che i dati siano informazioni interne, riservate o strategiche non condivisibili (53,8%). A seguire in ugual misura la diffidenza verso soggetti esterni che potrebbero gestire i dati e in egual misura i timori sulla sicurezza dei dati aziendali (30,8%) e infine la scarsa possibilità di vedere dei vantaggi economici (15,4%).

Questo quadro evidenzia un approccio cauto o difensivo alla condivisione dei dati, motivato da preoccupazioni legittime sulla perdita di controllo, sulla protezione delle informazioni e sul rischio di esposizione competitiva.

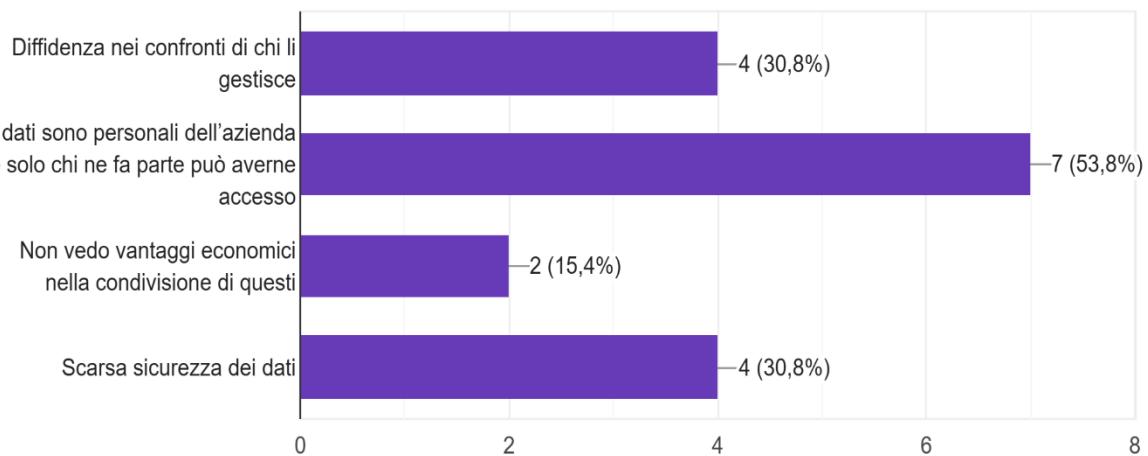


Grafico 15. Motivazioni alla non condivisione dei dati aziendali

4.2.7 Grado di accessibilità da esterno ritenuto adeguato alle diverse tipologie di dato

Come si vede nel grafico 16 emergono tendenze chiare.

I dati sensibili di profilo cliente sono quelli su cui le aziende mostrano la maggiore restrizione all'accesso esterno, con numerose risposte che ne indicano l'inaccessibilità totale.

I dati legati alla logistica e di monitoraggio del flusso di produzione sono in media percepiti come parzialmente accessibili, indicando una certa apertura se supportata da garanzie e finalità chiare.

I dati legati alle specifiche di produzione sono trattati con maggiore cautela rispetto ai dati di flusso di produzione, ma meno dei dati di profilo cliente, segno che l'informazione tecnica è percepita come strategica ma condivisibile in contesti controllati.

In generale, il grado di apertura varia in funzione della criticità percepita del dato e del rischio associato alla sua divulgazione. Le aziende dimostrano una buona capacità di valutazione differenziata, selettiva e consapevole.

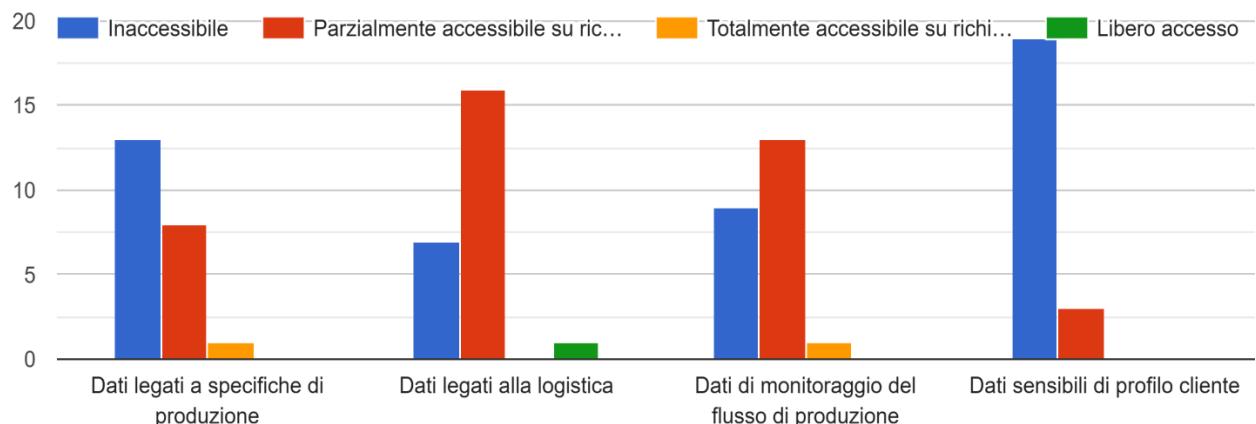


Grafico 16. Grado di accessibilità ritenuto adeguato alle diverse tipologie di dato

4.2.8 Conoscenza dei criteri di sicurezza riguardo i dati informatici e alle tematiche in ambito Cybersecurity

La maggioranza assoluta delle aziende rispondenti (68%) si dichiara consapevole dei criteri di sicurezza informatica e delle principali tematiche connesse alla cybersecurity.

Questo è un dato significativo, che riflette l'effetto positivo delle iniziative di informazione e formazione legate al GDPR e la maggiore attenzione delle imprese verso la protezione dei dati e dei sistemi, anche alla luce della crescente digitalizzazione e delle minacce informatiche in aumento.

Tuttavia, una minoranza residuale (32%) dichiara di non conoscere o non essere aggiornata, suggerendo l'esigenza di interventi mirati su queste realtà, specialmente se operano in settori ad alta criticità o trattano informazioni sensibili.

Questo risultato è coerente con il crescente impegno istituzionale e normativo volto a promuovere la cultura della sicurezza digitale, in particolare a seguito dell'introduzione del Regolamento Europeo GDPR (Regolamento UE 2016/679) [170].

Secondo il rapporto Clusit 2024 (Associazione Italiana per la Sicurezza Informatica) [171], il 70% delle aziende italiane dichiara di aver intrapreso azioni strutturate di cybersecurity, mentre solo una minoranza risulta ancora vulnerabile per scarsa consapevolezza o risorse insufficienti.

Anche il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) [172] dedica ampio spazio al rafforzamento delle competenze digitali e della sicurezza, con interventi specifici in ambito aziendale.

Tuttavia, una minoranza di imprese intervistate non possiede ancora un livello adeguato di conoscenza, suggerendo la necessità di ulteriori azioni informative e formative, soprattutto nelle PMI che non dispongono di personale specializzato [173].

4.2.9 Tecniche di sicurezza informatiche adottate

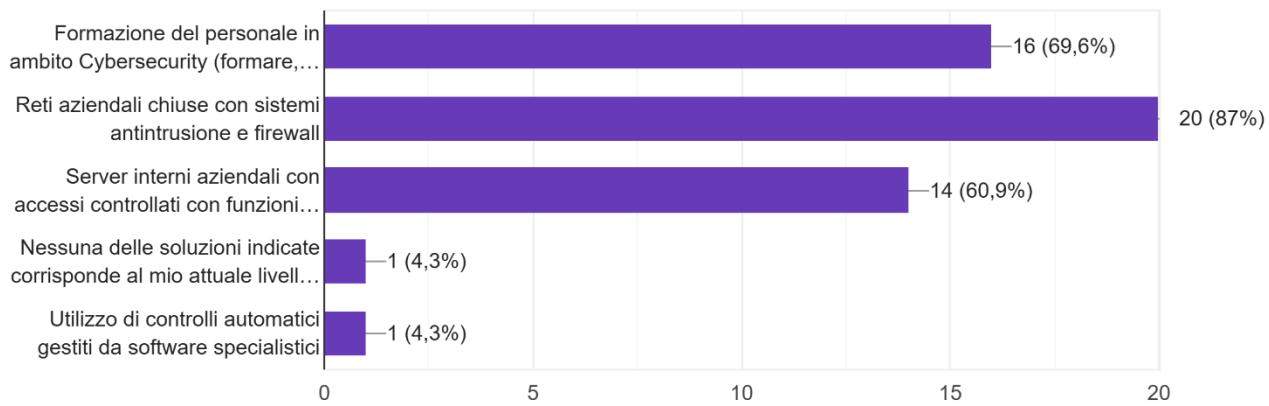


Grafico 17. Tecniche di sicurezza informatiche adottate

Come si vede dal grafico 17 le tecniche di sicurezza informatica più frequentemente adottate dalle aziende rispondenti risultano essere le Reti aziendali chiuse con sistemi antintrusione e firewall, adottate dall'87% delle aziende rispondenti. A seguire la Formazione del personale in ambito Cybersecurity, 69,9% e i Server interni aziendali con accessi controllati e backup custoditi, presenti nel 60,9% delle risposte.

L'utilizzo di controlli automatici gestiti da software specialistici è stato menzionato solo una volta.

Un solo rispondente ha dichiarato che nessuna delle soluzioni indicate corrisponde al proprio livello di protezione.

Le risposte indicano una buona consapevolezza della sicurezza infrastrutturale e della formazione interna, ma un'adozione ancora limitata di strumenti automatizzati avanzati.

4.2.10 Conoscenza delle soluzioni Cloud

La grande maggioranza delle aziende (92%) ha dichiarato di essere a conoscenza delle soluzioni Cloud, comprese le piattaforme SaaS (Software as a Service). Solo una minima parte (8%) ha risposto negativamente.

Il dato indica un'elevata familiarità di base con le tecnologie di cloud computing all'interno del campione esaminato, probabilmente favorita dalla diffusione quotidiana di strumenti come Google Drive o Dropbox anche in contesti non specialistici.

Inoltre, una parte consistente delle aziende (80%) ha effettivamente integrato soluzioni Cloud nelle proprie attività operative, mentre una quota residuale (20%) non le adotta ancora.

Questo suggerisce che, pur in presenza di una conoscenza diffusa del Cloud (come evidenziato nella domanda precedente), l'adozione concreta risulta più selettiva, probabilmente legata a considerazioni su costi, infrastruttura interna o necessità specifiche dei processi aziendali.

In riferimento alle risposte date alle domande precedenti, in relazione alla gestione dei dati dell'azienda, sulla disponibilità alla condivisione di dati per servizi Cloud emerge una distribuzione articolata come mostrato nel grafico 18:

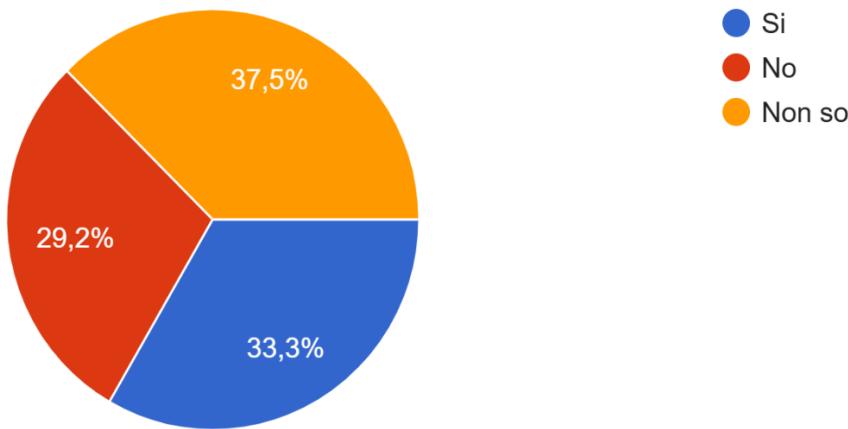


Grafico 18. Disponibilità alla condivisione dei dati aziendali per servizi Cloud

- Il 33,3% delle aziende dichiarano di essere disponibili alla condivisione dei dati per servizi Cloud;
- Il 37,5% rispondono "Non so", segnalando incertezza o scarsa valutazione del tema;
- Il 29,2% affermano di essere contrarie alla condivisione.

Questo quadro suggerisce una divisione piuttosto equilibrata tra apertura, rifiuto e indecisione. La presenza significativa di risposte "Non so" indica una mancanza di posizionamento strategico chiaro sul tema della gestione esterna dei dati, potenzialmente legata a dubbi su sicurezza, controllo o opportunità operative.

Infine, riguardo la percezione della vulnerabilità dei servizi Cloud rispetto ai server aziendali emerge che una quota significativa di aziende (62,5%) ritiene i servizi Cloud più vulnerabili rispetto ai sistemi di protezione interni aziendali e la restante parte (37,5%) non percepisce differenze sostanziali, oppure considera il Cloud ugualmente o meno vulnerabile.

Questo indica che, pur conoscendo le soluzioni Cloud (come visto nelle domande precedenti), molte aziende nutrono ancora diffidenze legate alla sicurezza, e questo può costituire un freno all'adozione o alla piena integrazione.

4.2.11 Conclusioni

Dall'analisi delle risposte raccolte nella seconda sezione del questionario, emerge un quadro articolato e interessante del livello di consapevolezza, adozione e percezione delle tecnologie e dei principi legati all'Industria 4.0 da parte delle aziende rispondenti.

Consapevolezza generale e fonti di informazione (Domande 18–19)

La maggior parte delle imprese dichiara di conoscere il concetto di Industria 4.0, anche se con livelli di approfondimento variabili. Le principali fonti informative risultano essere canali sia formali che informali, con una significativa incidenza di occasioni di confronto diretto (seminari, conferenze e fiere), riviste specializzate e, in alcuni casi, passa parola di settore

Conoscenza delle tecnologie abilitanti (Domanda 20)

I dati mostrano una buona familiarità con tecnologie consolidate come: Internet of Things, Cloud Computing e Sensori Smart. Tecnologie più complesse o emergenti, come Sistemi Cyberfisici (CPS Cyber Physical System) e Sistemi di sicurezza cibernetica (CSS CyberSecurity System), risultano invece meno conosciute, segnalando un divario di maturità digitale.

Finanziamenti e incentivi (Domande 21–23)

Nonostante un discreto livello di conoscenza dell'esistenza di bandi e strumenti di supporto pubblico, solo una parte del campione ha effettivamente usufruito di incentivi, come quelli previsti dalla Legge Calenda o dalla Nuova Sabatini. Le risposte segnalano difficoltà di accesso o mancata attivazione, e indicano la necessità di azioni informative più efficaci.

Conformità e sicurezza dei dati (Domande 24–30)

La quasi totalità delle imprese è a conoscenza del GDPR, e molte dichiarano di aver implementato azioni concrete di adeguamento, tra cui:

- Fornire strumenti di consenso aggiornati con le nuove normative.
- Informare l'utente/cliente riguardo alle finalità del trattamento dei suoi dati personali e la profilazione alla quale sarà soggetto.
- Monitorare costantemente la gestione degli accessi e i permessi ai dati.

In tema di cybersecurity, le misure più adottate sono:

- Reti aziendali chiuse con sistemi antintrusione e firewall.
- Formazione del personale.
- Server interni aziendali con accessi controllati e backup custoditi.

Tecniche più evolute come software di monitoraggio automatico risultano meno diffuse, lasciando margini di miglioramento.

Cloud e percezione della sicurezza (Domande 31–34)

La maggioranza delle aziende rispondenti conosce le soluzioni Cloud (es. SaaS) e circa la metà le adotta attivamente.

Tuttavia, la disponibilità alla condivisione di dati aziendali via Cloud è limitata e condizionata dalla percezione di vulnerabilità.

Alcune aziende ritengono i sistemi interni più sicuri rispetto ai servizi esterni, mentre altre dichiarano incertezza sul tema, a testimonianza di una fiducia non ancora pienamente consolidata.

Il campione analizzato evidenzia un buon livello di conoscenza diffusa del paradigma 4.0, con un forte interesse per le tecnologie digitali più mature e una certa consapevolezza dei requisiti normativi e di sicurezza.

Tuttavia, emergono differenze marcate tra conoscenza teorica e applicazione pratica, oltre a diffidenze persistenti in relazione alla gestione e condivisione dei dati, soprattutto in ambienti Cloud.

Il percorso verso una piena trasformazione digitale richiede quindi ulteriori investimenti in informazione, accompagnamento e cultura della sicurezza, affinché la conoscenza diventi adozione consapevole e valore competitivo reale.

4.3 Implementazione effettiva dei concetti di Industria 4.0

4.3.1 Attività ritenute importanti per l’azienda

Come indicato in tabella 15 le risposte delle aziende indicano una chiara priorità assegnata ad alcune attività strategiche e operative nel contesto dell’Industria 4.0.

Le prime posizioni del ranking sono occupate da:

- Flessibilità organizzativa e predisposizione al cambiamento
- Sostenibilità ambientale e risparmio energetico

Questi aspetti riflettono l’esigenza di adattamento dinamico e attenzione crescente alla sostenibilità, elementi centrali nella competitività moderna.

Seguono in seconda posizione:

- Formazione sul campo dei dipendenti sull’uso e gestione di strumenti digitali,
- Raccolta e analisi dei dati sulle attività operative

In terza posizione compare:

- L’allocazione di risorse alla Ricerca e Sviluppo

a conferma dell’importanza attribuita all’innovazione come leva per la crescita.

Altre attività rilevanti, sebbene con minore frequenza, includono:

- Automazione dei processi produttivi,
- Manutenzione predittiva,
- Attrazione di manager esperti in innovazione,
- Offerta di servizi a valore aggiunto,
- Integrazione orizzontale e verticale,
- Uso di robot collaborativi (COBOT),
- Produzione customizzata e simulazione digitale.

In coda al ranking troviamo:

- Progettazione assistita e attrazione di risorse esperte in meccatronica, a indicare che, pur essendo rilevanti, queste attività non rappresentano ancora una priorità per la maggioranza.

Il quadro che emerge è coerente con un modello aziendale orientato all’adattabilità organizzativa, alla sostenibilità, alla formazione continua e al rafforzamento della capacità analitica interna.

In questo contesto, le tecnologie 4.0 sono viste come strumenti abilitanti, ma è la visione strategica a guidare le scelte operative.

Attività ritenute importanti per l'azienda	Ranking
Flessibilità organizzativa e predisposizione al cambiamento	1
Sostenibilità ambientale e risparmio energetico	1
Formazione sul campo dei dipendenti su utilizzo e gestione dei nuovi strumenti digitali	2
Raccolta ed analisi di dati sulle attività in essere	2
Allocazione di risorse ad attività di ricerca e sviluppo	3
Automazione dei processi produttivi	4
Manutenzione preventiva e predittiva	4
Attrarre manager per governare innovazione e digitalizzazione	5
Offerta di servizi in supporto ai prodotti fisici	5
Integrazione orizzontale (espansione delle attività dell'impresa a prodotti, processi, know-how affini alla filiera già esistente) tramite protocolli standard di comunicazione	6
Formalizzazione di un approccio strategico per incentivare l'innovazione	7
Integrazione verticale (internalizzazione delle fasi a monte/a valle della filiera in cui già opera l'Azienda) tramite protocolli standard di comunicazione	7
Produzione di piccoli lotti fortemente customizzati	7
Uso di Robot collaborativi (COBOT)	7
Attrarre risorse esperte di meccatronica	8
Progettazione dei prodotti assistita dal calcolatore/strumenti di simulazione	8

Tabella 15. Attività importanti per l'azienda

4.3.2 Grado di implementazione delle tecnologie 4.0

La tabella 16 riporta, per ogni tecnologia 4.0, il grado di implementazione delle aziende rispondenti. L'analisi mostra una grande eterogeneità. I risultati possono essere suddivisi in tre gruppi principali.

Tecnologie 4.0	Molto basso	Basso	Medio	Alto
Big Data Analytics	6	5	10	4
Cloud	2	3	11	3
Internet of Things	5	4	11	3
Realtà virtuale	11	6	3	1
Robotica e Intelligenza Artificiale	5	2	10	4
Sensori smart	5	2	8	4
Sistemi Cyberfisici	6	5	5	2
Sistemi di sicurezza cibernetica	4	3	5	5
Stampa 3D, Addictive Manufacturing	12	6	4	1
Wearable e dispositivi smart	7	6	7	1

Tabella 16. Tabella aggregata grado di implementazione tecnologie 4.0

Tecnologie con implementazione più avanzata

- Cloud Computing: è la tecnologia più matura tra quelle indagate. 3 aziende dichiarano un'implementazione alta, 11 media, e solo 5 la collocano nei livelli basso o molto basso. Questo conferma che il cloud è ormai una componente fondamentale dell'infrastruttura digitale delle imprese.
- Big Data Analytics: pur essendo una tecnologia complessa, 10 aziende dichiarano un livello medio e 4 alto, a fronte di 6 valutazioni molto basse. L'analisi dei dati viene sempre più percepita come un asset competitivo.

- Robotica e Intelligenza Artificiale: presenta una discreta penetrazione: 10 aziende indicano una diffusione media e 4 alta, segno che l'automazione avanzata comincia a essere presente anche in contesti industriali non esclusivamente high-tech.

Tecnologie in fase di transizione

- Internet of Things e Sensori Smart: entrambe registrano un buon numero di implementazioni medie (11 e 8 rispettivamente) ma restano ancora frenate da alcune valutazioni molto basse. L'interesse c'è, ma mancano ancora investimenti strutturali diffusi.
- Sistemi di Sicurezza Cibernetica (CSS): mostrano una discreta adozione, con 5 aziende che li valutano medi e 5 alti, ma anche 7 tra molto basso e basso. Questo dato potrebbe indicare una polarizzazione tra aziende più evolute digitalmente e altre meno preparate.
- Sistemi Cyberfisici (CPS): la maggior parte delle aziende dichiara una presenza media (5) o bassa (5), con una quota significativa che segnala molto basso (6). L'adozione resta limitata, ma si nota un lieve avvio.

Tecnologie poco implementate

- Realtà Virtuale: è la tecnologia meno adottata, con ben 11 risposte "molto basso" e solo 1 "alta". È percepita come meno rilevante per le esigenze immediate, probabilmente per i costi o la scarsa applicabilità al settore di riferimento.
- Stampa 3D / Additive Manufacturing: presenta anch'essa un'elevata incidenza di risposte molto basse (12) e solo 1 risposta alta. È probabile che questa tecnologia sia ancora percepita come sperimentale o adatta a nicchie specifiche.
- Wearable e dispositivi smart: anche qui le valutazioni si concentrano tra molto basso (7) e medio (7), con un'unica azienda che ne dichiara un'adozione alta. Si tratta di strumenti poco diffusi nei processi produttivi e più utilizzati in ambito consumer o retail.

Come mostrato nel grafico 19 la mappa dell'adozione tecnologica evidenzia un contesto dove le tecnologie più infrastrutturali e consolidate (Cloud, Big Data) risultano ben avviate. Le tecnologie più avanzate ma complesse (AI, IoT, Robotica) mostrano un'adozione in corso ma disomogenea e le tecnologie emergenti o sperimentali (VR, Wearable, Additive Manufacturing) faticano ancora a imporsi su larga scala.

Questo panorama suggerisce la necessità di politiche di supporto mirate alla diffusione delle tecnologie meno presenti e formazione tecnica per le imprese che intendono affrontare un processo di trasformazione digitale più profondo.

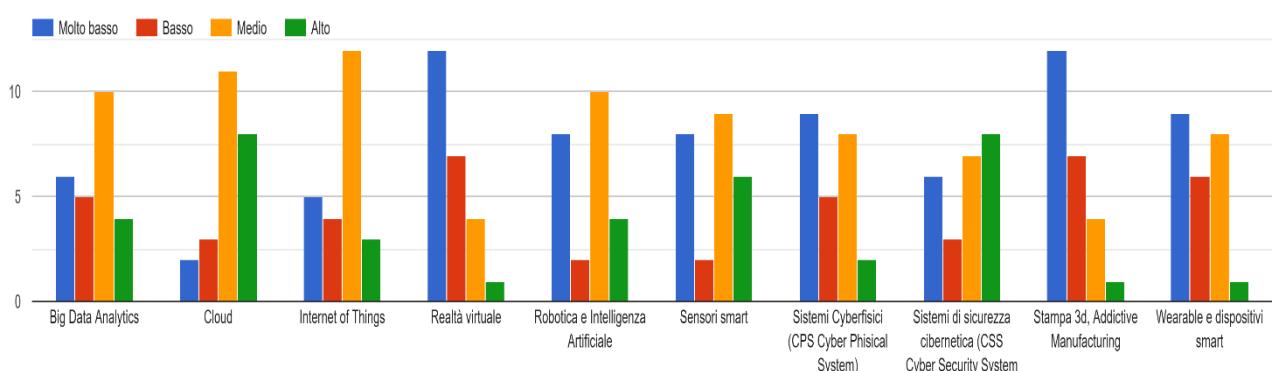


Grafico 19. Grado di effettiva implementazione tecnologie 4.0

4.3.3 Benefici attesi dall'implementazione delle tecnologie 4.0 già in uso e di quelle che si è predisposti ad adottare

L'analisi dei benefici attesi, come mostrato nella tabella 17, evidenzia un chiaro orientamento verso obiettivi di ottimizzazione produttiva e organizzativa:

- I benefici più segnalati sono l'aumento della produttività (95,8%) e dell'efficienza (91,7%), seguiti da miglioramenti qualitativi nei prodotti/servizi e nell'affidabilità dei processi (75%).
- Risultati solidi anche per la riduzione dei costi (70,8%) e delle tempistiche (50%), a conferma dell'importanza attribuita al contenimento dei tempi e al miglioramento della competitività operativa.
- Apprezzabile è il riconoscimento della sicurezza dei dati (58,3%), aspetto strategico in una fase di transizione digitale.
- Meno frequenti, ma comunque significativi, sono i riferimenti a trasparenza nella supply chain, sostenibilità energetica e soddisfazione dei clienti, che riflettono una visione più sistematica dell'innovazione.

Beneficio atteso	Rispondenti (%)	Rispondenti (n)
Aumento della produttività	95,8%	23
Aumento di efficienza	91,7%	22
Aumento della qualità dei prodotti/servizi	75%	18
Aumento di affidabilità dei processi	75%	18
Riduzione dei costi	70,8%	17
Riduzione delle tempistiche (time to market, ecc.)	50%	12
Miglioramento del processo decisionale	54,2%	13
Aumento della sicurezza dei dati	58,3%	14
Aumento della trasparenza nella supply chain	33,3%	8
Interoperabilità tra i vari attori della catena del valore	25%	6
Miglioramento del processo produttivo	25%	6
Livellamento dei carichi energetici	29,2%	7
Maggiore soddisfazione dei clienti	29,2%	7
Realizzazione di prodotti customizzati	4,2%	1

Tabella 17. Benefici attesi dall'implementazione delle tecnologie 4.0

4.3.4 Implementazione di un piano strategico per l'innovazione

Come si evince dal grafico 20 i dati indicano che oltre la metà delle aziende (54,2%) ha già implementato un piano strategico formalizzato per l'innovazione, mentre un ulteriore 37,5% è in fase di sviluppo. Questo suggerisce una forte propensione verso l'organizzazione strutturata del cambiamento e della trasformazione digitale.

Solo due aziende (8,3%) dichiarano di non avere alcun piano, un dato marginale che conferma come l'innovazione sia ormai percepita come leva competitiva fondamentale anche nel tessuto industriale italiano.

L'alto tasso di proattività (oltre il 90% tra piani attivi o in sviluppo) si inserisce coerentemente con i risultati emersi nella domanda precedente sui benefici attesi, in cui produttività, efficienza e qualità sono obiettivi dichiarati.

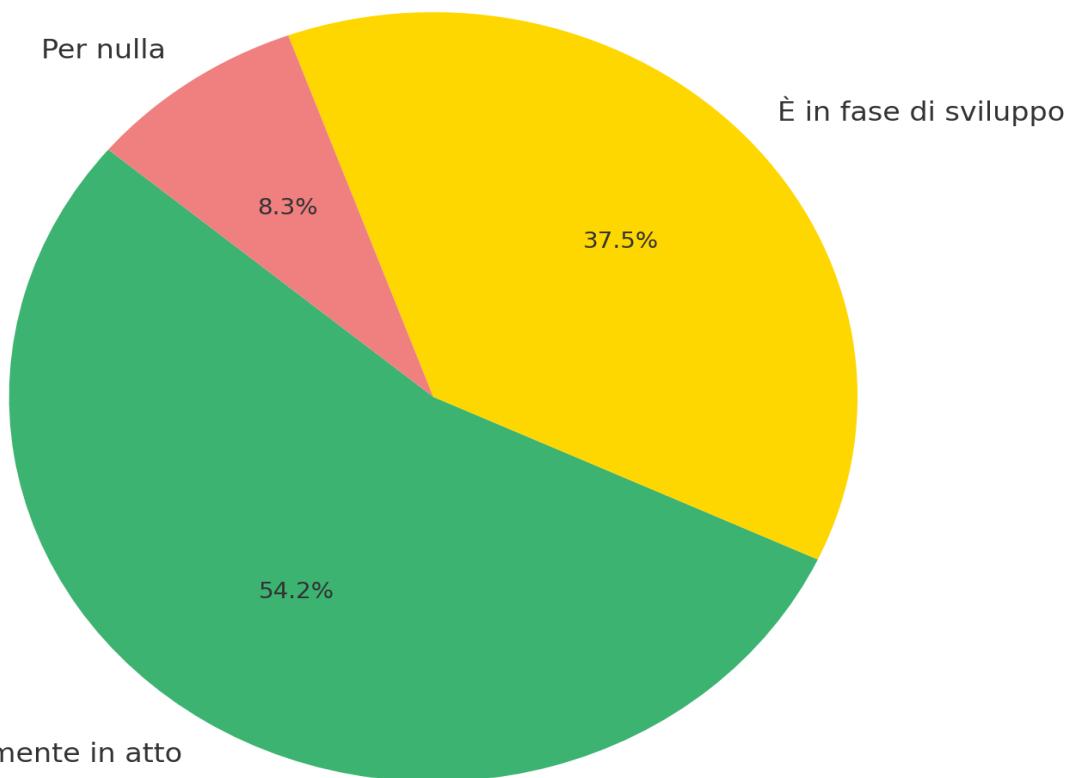


Grafico 20. Implementazione piano di innovazione

4.3.5 Conclusioni

L'analisi delle risposte raccolte evidenzia un livello complessivamente positivo di consapevolezza e adozione dei concetti chiave dell'Industria 4.0, seppur con significative differenze tra le tecnologie e le azioni strategiche.

In primo luogo, le attività ritenute più importanti per il business (domanda 35) riflettono una chiara attenzione verso produttività, efficienza e qualità. Queste priorità emergono anche nella selezione delle tecnologie effettivamente implementate (domanda 36), dove si nota una maggiore diffusione di strumenti consolidati come Cloud Computing e Big Data Analytics, mentre soluzioni più avanzate (es. Realtà Virtuale, Robotica collaborativa, Sistemi Cyberfisici) risultano ancora poco esplorate o in fase iniziale di adozione.

I benefici attesi (domanda 37) confermano questa tendenza: le aziende mirano principalmente a ottimizzare i processi produttivi, ridurre i costi e migliorare la qualità, indicando un orientamento pragmatico e orientato al ritorno sull'investimento tecnologico.

Un dato particolarmente rilevante riguarda la presenza di piani strategici formalizzati per l'innovazione (domanda 38): oltre il 90% delle aziende dichiara di averne già uno attivo o in fase di sviluppo, segnale di una crescente maturità nella gestione del cambiamento digitale.

Infine, sebbene il numero di aziende che ha già implementato pienamente tutte le tecnologie abilitanti sia ancora limitato, i dati suggeriscono un percorso in evoluzione: le imprese stanno investendo in competenze, strumenti e infrastrutture, spesso con approccio incrementale, ma con chiari obiettivi di miglioramento competitivo.

In sintesi, la trasformazione digitale è in atto: la maggior parte delle aziende rispondenti ha già intrapreso il proprio percorso di transizione verso l'Industria 4.0, pur con margini ancora ampi di diffusione e consolidamento delle tecnologie più avanzate.

4.4 Conoscenza, implementazione e utilizzo dei Digital Twin (DT)

4.4.1 Conoscenza del concetto di DT

Dall'analisi emerge che la maggioranza relativa delle aziende (58,3%) dichiara di conoscere il concetto di Digital Twin, a fronte di un 41,7% che non ne ha mai sentito parlare. Il dato evidenzia un livello di familiarità moderato, in linea con la natura ancora emergente di questa tecnologia nel contesto industriale italiano.

Il fatto che quasi la metà del campione non conosca ancora il Digital Twin evidenzia un'area di miglioramento, soprattutto in termini di divulgazione e formazione. Tuttavia, l'interesse per il tema potrebbe crescere rapidamente, vista la sua stretta correlazione con i benefici già riconosciuti in ambito 4.0 (come automazione, simulazione e ottimizzazione dei processi).

4.4.2 Tecnologie digitali usate nell'azienda

I dati raccolti, come illustrato nel grafico 21, mostrano una predominanza nell'utilizzo del Cloud, indicato da 19 aziende su 22 (86,4%), confermandosi come la tecnologia digitale più diffusa. Il Cloud è infatti la base abilitante per molte altre soluzioni, facilitando l'accesso remoto ai dati, la scalabilità e l'integrazione tra sistemi.

Seguono a breve distanza Big Data e Intelligenza Artificiale, adottate da 15 aziende. Questa diffusione testimonia una crescente sensibilità verso la valorizzazione del patrimonio informativo aziendale e l'automazione dei processi decisionali attraverso modelli predittivi e analitici.

Internet of Things (IoT), citata da 10 aziende, mostra una presenza significativa, soprattutto in settori produttivi dove il monitoraggio real-time e la sensoristica sono fondamentali. A ruota troviamo robotica e automazione (9 risposte), anch'esse centrali nel paradigma Industria 4.0.

Più contenuto l'utilizzo di High Performance Computing (HPC), menzionato da 6 aziende, dato comprensibile vista la complessità e gli elevati requisiti infrastrutturali di questa tecnologia, spesso adottata in settori avanzati come la ricerca, l'aerospazio e l'ingegneria di prodotto.

Il quadro che emerge è coerente con i trend dell'Industria 4.0: le aziende stanno privilegiando tecnologie digitali con impatto immediato sulla produttività e sulla gestione dei dati, mentre l'adozione di tecnologie più complesse o costose rimane per ora meno estesa. La progressiva maturazione digitale del tessuto imprenditoriale potrebbe tuttavia favorirne una maggiore penetrazione nei prossimi anni.

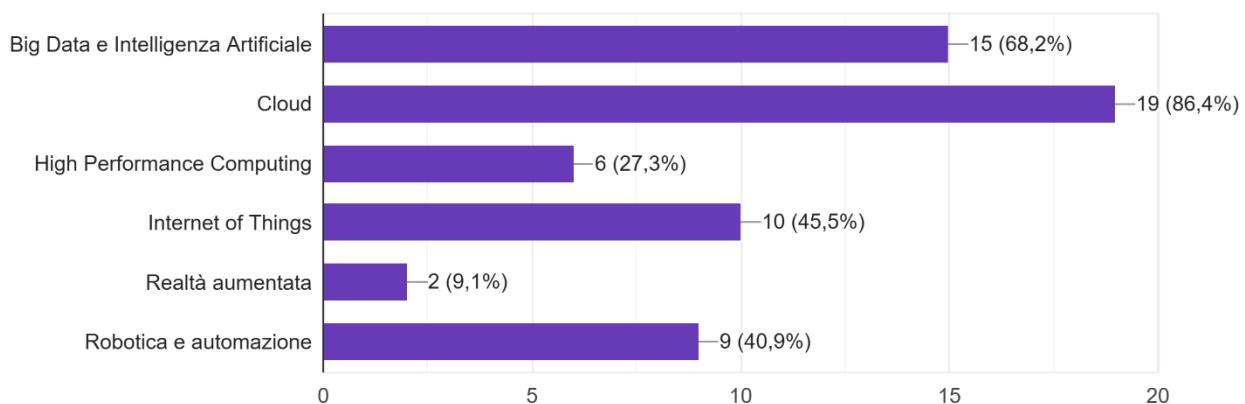


Grafico 21. Tecnologie digitali usate in azienda

4.4.3 Conoscere il significato e la potenzialità delle tecnologie di Digital Twin

Il quadro che emerge riflette un livello di conoscenza ancora eterogeneo sul tema dei Digital Twin. Solo un terzo delle aziende (33,3%) afferma di conoscere chiaramente la tecnologia e i suoi utilizzi.

Il gruppo più numeroso (37,5%) dichiara invece di non averne mai sentito parlare.

Un ulteriore 29,2% ha una conoscenza parziale o superficiale, avendo sentito parlare del tema ma senza una reale comprensione degli ambiti applicativi.

Questo evidenzia che il concetto di Digital Twin non è ancora consolidato nel tessuto imprenditoriale del campione analizzato. Le aziende sono in una fase in cui l'interesse e la diffusione tecnologica sono in crescita, ma la maturità informativa e strategica su questo tema rimane limitata.

4.4.4 Reputa utile, per la sua attività, la possibilità di avere informazioni in tempo reale sullo stato dei propri macchinari, dell'intera linea produttiva e sulle attività svolte dai dipendenti?

I risultati mostrano una larga maggioranza di aziende (75%) che ritiene utile disporre di informazioni in tempo reale sulla propria operatività interna. Questo conferma un alto livello di interesse verso la trasparenza dei processi e l'importanza attribuita a strumenti che permettano monitoraggio e controllo immediato di macchinari, linee produttive e attività umane.

La minoranza (25%) che non riconosce utilità in questo tipo di funzionalità potrebbe riflettere settori meno orientati alla produzione industriale, o realtà meno digitalizzate in cui il controllo manuale è ancora la norma.

In ogni caso, il dato rappresenta un potenziale punto di ingresso per le soluzioni Digital Twin, che si fondano proprio su questa capacità di rilevamento, modellazione e feedback continuo.

4.4.5 Importanza delle implementazioni

Come mostrato nel grafico 22 e nella tabella 18, che riportano le preferenze espresse dalle aziende rispondenti sull'adozione delle tecnologie abilitanti, emerge un interesse marcato verso l'adozione di strumenti digitali avanzati nelle attività produttive. In particolare:

- Le analisi preventive e la possibilità di controllo da remoto risultano tra le implementazioni considerate più importanti da una larga fetta del campione, con molti rispondenti che hanno attribuito loro punteggi di "Importante" o "Molto importante".
- Anche la simulazione digitale, la condivisione cloud dei dati e il monitoraggio in tempo reale dei macchinari e delle linee produttive sono percepiti come strategici.
- Solo una percentuale marginale ha espresso disinteresse ("per nulla importante"), mentre poche risposte sono state classificate come "non applicabili", segno di una diffusa consapevolezza rispetto a queste tematiche.

Tutto ciò conferma che le tecnologie abilitanti, specie quelle riconducibili al paradigma dei Digital Twin, sono considerate leve strategiche per l'innovazione e l'efficienza operativa.

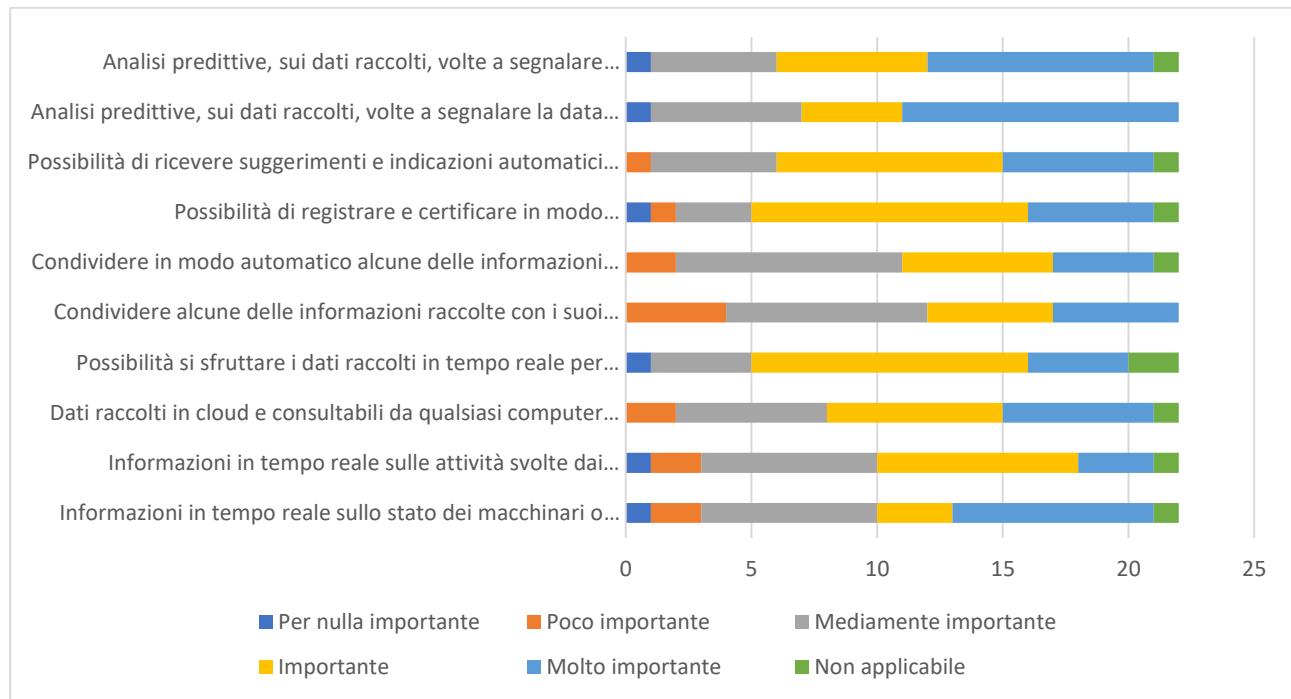


Grafico 22. Importanza delle implementazioni

	Per nulla importante	Poco importante	Mediamente importante	Importante	Molto importante	Non applicabile
Informazioni in tempo reale sullo stato dei macchinari o dell'intera linea produttiva	1	2	7	3	8	1
Informazioni in tempo reale sulle attività svolte dai dipendenti	1	2	7	8	3	1
Dati raccolti in cloud e consultabili da qualsiasi computer connesso alla rete ed eventualmente da smartphone	0	2	6	7	6	1
Possibilità di sfruttare i dati raccolti in tempo reale per effettuare delle simulazioni matematico-statistiche sui processi produttivi col fine di efficientare la produzione e le risorse impiegate	1	0	4	11	4	2

Condividere alcune delle informazioni raccolte con i suoi fornitori al fine di schedulare meglio le proprie attività produttive	0	4	8	5	5	0
Condividere in modo automatico alcune delle informazioni raccolte (ad esempio stato dettagliato di produzione di una commessa) con i suoi clienti al fine di rendere più trasparenti i rapporti di business	0	2	9	6	4	1
Possibilità di registrare e certificare in modo automatico/sempiautomatico tutte le lavorazioni o attività necessarie alla produzione ed eventualmente previste dal contratto	1	1	3	11	5	1
Possibilità di ricevere suggerimenti e indicazioni automatici riguardo la conformità dei processi/lavorazioni rispetto alle norme ISO di settore	0	1	5	9	6	1
Analisi predittive, sui dati raccolti, volte a segnalare la data futura di guasto dei macchinari	1	0	6	4	11	0
Analisi predittive, sui dati raccolti, volte a segnalare l'impossibilità di consegnare una commessa in tempo	1	0	5	6	9	1

Tabella 18. Importanza delle implementazioni

4.4.6 Tutti i benefici dei Digital Twin sono ad oggi oggetto di incentivi statali riguardo l'Industria 4.0. Sarebbe disposto ad investire su tali implementazioni?

Come si vede nel grafico 23, i dati evidenziano una forte apertura all'investimento nei Digital Twin: oltre il 91% delle aziende che hanno risposto si dichiara interessato alla tecnologia. Tuttavia, la maggioranza (65,2%) preferisce attendere conferme attraverso casi d'uso concreti prima di passare all'implementazione.

Questa prudenza è tipica nei contesti di adozione di tecnologie emergenti, dove la percezione di rischio e l'incertezza sugli effettivi benefici possono rallentare la fase iniziale.

Solo una piccola minoranza (8,7%) non reputa la tecnologia utile, segno che il Digital Twin è riconosciuto come un'innovazione promettente, anche se ancora in fase esplorativa per molte aziende.



Grafico 23. Apertura all'implementazione della tecnologia di DT

4.4.7 Investimenti in Industria 4.0 effettuati negli ultimi 3 anni e miglioramenti effettivi

Oltre due terzi del campione (66,7%), come mostrato nella tabella 19, ha dichiarato di aver già investito negli ultimi tre anni in iniziative legate all'Industria 4.0. Questo conferma la crescente penetrazione delle tecnologie avanzate nel tessuto imprenditoriale italiano, anche tra le PMI.

Il restante terzo, pur non avendo ancora effettuato investimenti, potrebbe comunque rappresentare un target sensibile se stimolato attraverso incentivi, formazione e casi studio di successo.

Risposta	Numero	Percentuale
Sì	16	66,7%
No	8	33,3%
(Nessuna risposta)	1	—

Tabella 19. Investimenti ti effettuati negli ultimi 3 anni in tecnologie per l'industria 4.0

La maggioranza delle aziende (75%) che hanno effettuato investimenti in tecnologie 4.0 ha dichiarato di aver ottenuto benefici concreti, anche in termini di aumento del fatturato. Questo risultato rafforza l'idea che l'adozione di tecnologie avanzate possa tradursi in vantaggi tangibili e misurabili sul piano economico.

4.4.8 Se ha effettuato o pensa di effettuare investimenti nell'Industria 4.0, in che lasso di tempo si aspetta di averne un ritorno economico?

La tabella 20 mostra che la maggior parte delle aziende (77,3%) prevede un ritorno economico nel medio periodo, indicativamente tra i 2 e i 3 anni. Questo riflette una visione pragmatica e realistica degli investimenti in Industria 4.0: non immediati, ma nemmeno troppo lontani.

Il 13,6% del campione si aspetta benefici già nel breve termine, segno che alcune imprese confidano in ritorni rapidi, probabilmente in virtù di progetti mirati o già in fase avanzata.

Solo una minoranza (9,1%) considera l'orizzonte del lungo periodo, il che potrebbe essere legato a investimenti strutturali o strategici di più ampia portata.

Lasso di tempo	Numero di risposte	Percentuale
Medio periodo (2–3 anni)	17	77,3%
Breve periodo (entro 1 anno)	3	13,6%
Lungo periodo (oltre 3 anni)	2	9,1%
<i>(Nessuna risposta)</i>	3	—

Tabella 20. Ritorno economico degli investimenti nell'industria 4.0

4.4.9 Settori in cui il Digital Twin potrà trovare nuovi ambiti di applicazione

L'analisi delle risposte, come indicato nel grafico 24, mostra una visione articolata e multidimensionale delle potenzialità future del Digital Twin nelle aziende italiane. Tra le categorie maggiormente indicate emergono:

- Manifattura e processi industriali (63,3%) si conferma come il primo ambito di applicazione potenziale, in continuità con gli usi attuali. Le aziende vedono nei Digital Twin uno strumento per ottimizzare processi produttivi, migliorare l'efficienza operativa e abilitare forme avanzate di manutenzione e controllo della qualità. Analogamente anche la sostenibilità e transizione verde è la testimonianza di una consapevolezza crescente sul ruolo del Digital Twin nella gestione intelligente nella riduzione delle emissioni e nell'ottimizzazione dei consumi.
- Sanità è un altro settore in forte evidenza (59,1%), segnalato per la crescente rilevanza delle simulazioni cliniche, della personalizzazione delle cure e del monitoraggio remoto. Il Digital Twin viene percepito come un supporto all'evoluzione verso la medicina predittiva e personalizzata.
- Smart cities compaiono in diverse risposte, a riprova del fatto che l'uso dei Digital Twin risulta utilizzabile per migliorare la qualità della vita dei propri abitanti, ottimizzare i servizi e promuovere uno sviluppo sostenibile.
- Infrastrutture e mobilità e agricoltura raccolgono un numero moderato di citazioni, ma rappresentano ambiti promettenti per l'applicazione del Digital Twin, in particolare nella gestione integrata di reti fisiche e nel monitoraggio delle condizioni ambientali e produttive.
- Anche settori emergenti o innovativi come il Metaverso, Banking e finance e i Personal Digital Twin (copia digitale dell'individuo) iniziano a trovare spazio tra le risposte, anche se in misura ancora

limitata. Questo suggerisce l'interesse verso applicazioni sperimentali e ad alta intensità tecnologica, ancora in fase di esplorazione.

- Le risposte che ricadono nella categoria “qualsiasi campo applicativo” indicano ulteriori settori non esplicitamente previsti nel questionario, suggerendo che la flessibilità e l'estensibilità della tecnologia Digital Twin è percepita anche oltre i confini settoriali tradizionali.

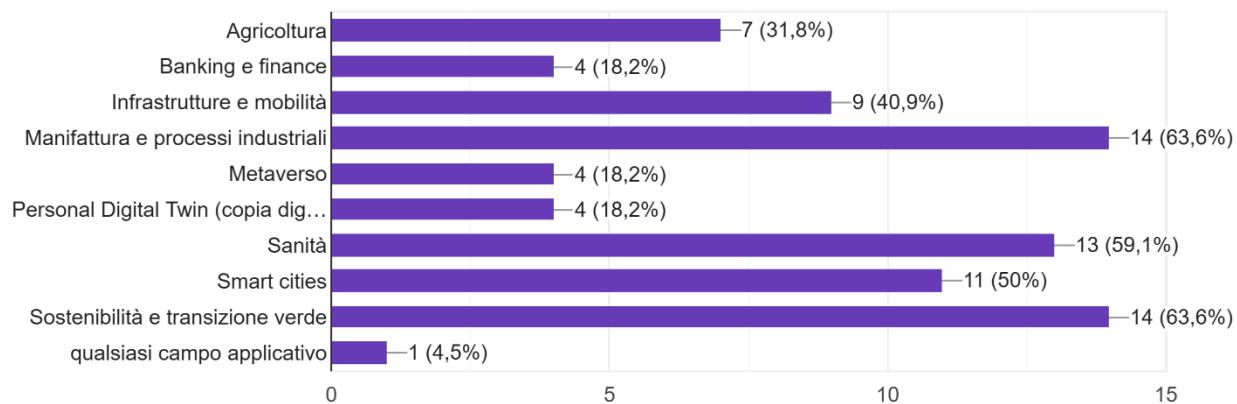


Grafico 24. Ambiti di futura applicazione dei DT

4.4.10 Utilità dei DT nella catena del valore e dei processi manageriali e decisionali

Come si evince dal grafico 25, emerge chiaramente come le aziende identifichino il Digital Twin come una risorsa trasversale applicabile a molteplici fasi della catena del valore.

- Sviluppo tecnologie e innovazione è la voce più selezionata, indicando che molte imprese vedono il Digital Twin come un abilitatore dell'innovazione, utile in fase di ricerca, progettazione e test virtuale di nuovi prodotti o soluzioni.
- Operations e produzione, si posiziona al secondo posto confermando che il Digital Twin viene considerato principalmente come uno strumento per ottimizzare i processi produttivi, migliorare l'efficienza e monitorare in tempo reale gli impianti. Questo risultato è coerente con la sua implementazione più diffusa in contesti industriali.
- Seguono la Logistica e Controllo di gestione due ambiti gestionali in cui il DT viene riconosciuto come valido supporto per prendere decisioni basate su simulazioni e dati integrati, in particolare per la gestione dei costi, delle risorse e della supply chain.
- Anche Governance e strategia e Marketing e vendite sono citati, sebbene con minore frequenza, suggerendo un iniziale riconoscimento del ruolo del Digital Twin anche in processi più strategici o customer-oriented.

Questa distribuzione conferma che le imprese cominciano a superare la visione “tecnica” del Digital Twin, aprendosi a un utilizzo più trasversale, in grado di influenzare l'intera catena del valore.

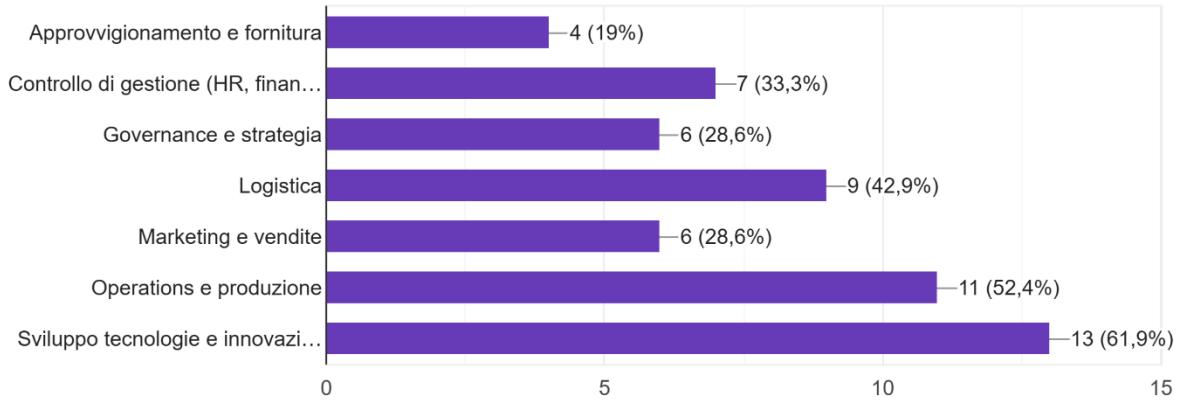


Grafico 25. Utilità dei DT nella catena del valore e nei processi manageriali e decisionali

4.4.11 Implementazioni di tecnologie Digital Twins nei processi aziendali dei rispondenti

La maggior parte delle aziende (68,2%) non ha ancora implementato tecnologie di Digital Twin, segnalando un gap tra conoscenza e adozione effettiva. Tuttavia, un altro 18,2% prevede di farlo a breve, indicando una intenzione attiva di evoluzione digitale. Solo il 13,6% ha già introdotto concretamente soluzioni basate su DT nei propri processi, segnalando una fase iniziale di penetrazione, ancora limitata ma in espansione.

Questo dato rispecchia le tendenze riscontrate in studi recenti, secondo cui l'adozione dei Digital Twin in Italia è ancora inferiore al 20% nelle PMI e più diffusa nelle grandi imprese manifatturiere ad alta intensità tecnologica [174].

Secondo un report di Markets&Markets [175], la crescita del mercato globale dei Digital Twin è stimata a un CAGR (Compound Annual Growth Rate) superiore al 35% fino al 2030, ma la traduzione di questo trend in implementazione reale nelle aziende italiane è ancora rallentata da fattori come costi iniziali, mancanza di competenze specialistiche e incertezza sul ROI [176].

Questo dato è coerente con quanto osservato in altri studi sul panorama industriale italiano: il Digital Twin è conosciuto e riconosciuto per le sue potenzialità, ma l'adozione pratica resta ancora in fase emergente, spesso condizionata da fattori quali costi, competenze tecniche e visione strategica.

4.4.12 Quali sono gli ambiti in cui il Digital Twin potrà trovare nuovi spazi di applicazione?

L'analisi delle risposte e il grafico 26 mostrano che le aziende percepiscono il Digital Twin come un potente abilitatore di efficienza operativa (citata nel 66,7% dei casi), con un forte potenziale nel miglioramento dei KPI economici e nella manutenzione predittiva. Queste aree si confermano coerenti con le applicazioni attuali della tecnologia, ma si estendono anche verso funzioni più strategiche.

La Sostenibilità ambientale emerge con una certa frequenza, segnalando la crescente attenzione delle imprese verso l'efficienza energetica e l'impatto ambientale.

La simulazione e gestione del rischio si prospetta come uno dei nuovi spazi di utilizzo, soprattutto per processi complessi e scenari predittivi.

La soddisfazione del cliente e CRM (Customer Relationship Management) evidenziano la volontà di sfruttare i Digital Twin anche in chiave di esperienza cliente e miglioramento dell'offerta.

L'accelerazione e l'innovazione e time to market: appaiono come leve per usare il DT nella prototipazione rapida e nel ciclo di vita prodotto.

Infine, la diversità delle risposte suggerisce che il Digital Twin è visto non solo come una tecnologia operativa, ma anche come strumento trasversale per la trasformazione digitale aziendale.



Grafico 26. Ambiti futuri di applicazione dei DT

4.4.13 Quali sono i principali benefici che i DT hanno portato alla sua azienda

Solo 13 aziende su 25 hanno risposto effettivamente a questa domanda. Come mostrato nel grafico 27, tra i benefici citati, l'efficienza operativa e la collaborazione interna risultano i principali vantaggi ottenuti, in linea con le risposte fornite alla domanda precedente (domanda 51, paragrafo 4.4.12). Benefici trasversali come innovazione e time to market, miglioramento KPI economici e manutenzione predittiva mostrano una visione già concreta dell'impatto positivo dei DT in azienda. La sostenibilità e la customer experience/CRM emergono anche qui mostrando un ampio spettro di ritorni tangibili dei DT.

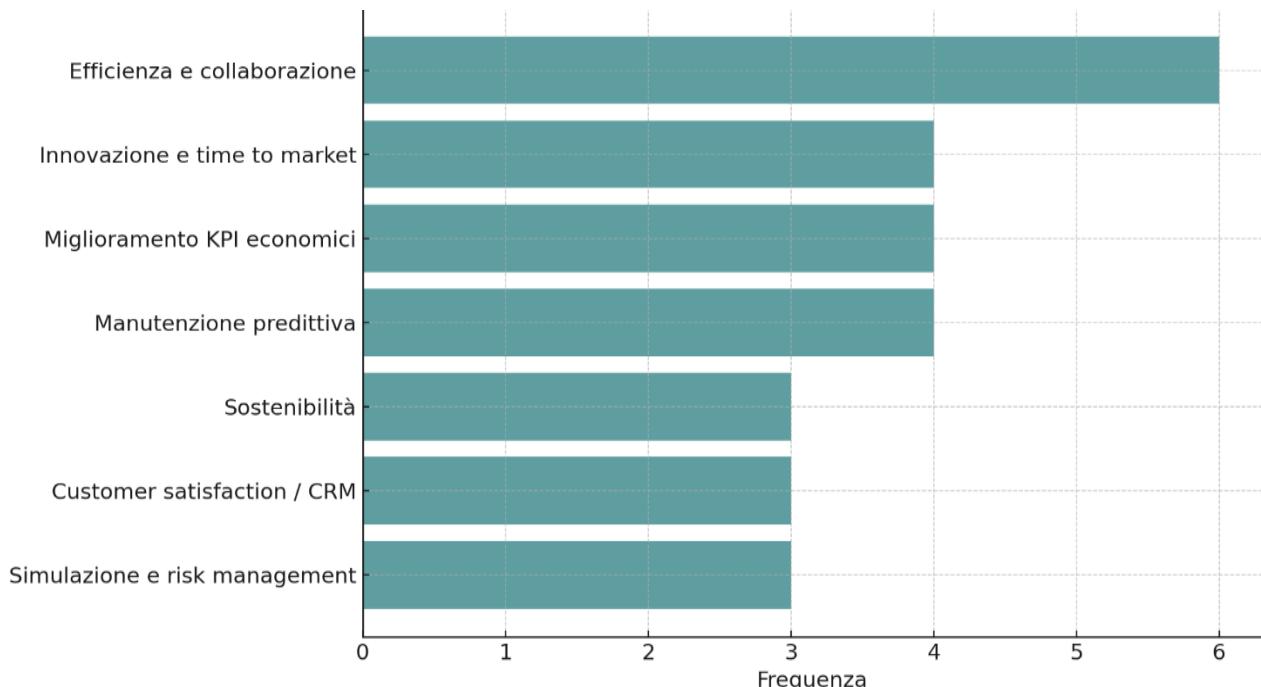


Grafico 27. Benefici riscontrati dall'adozione dei DT nelle aziende rispondenti

4.4.14 Principali ostacoli all'adozione dei DT

Come mostrato nel grafico 28, l'ostacolo più diffuso è rappresentato da barriere economiche e finanziarie: l'incertezza sul ritorno dell'investimento (ROI) e l'elevato costo iniziale (citati nel 61% delle risposte) scoraggiano le imprese, specialmente le PMI. Un secondo ostacolo importante è la mancanza di competenze tecniche e specialistiche interne, evidenziando un divario tra intenzione e capacità operativa. Seguono la mancanza di un business case strutturato e la difficoltà di inserire il DT in processi già consolidati. Infine, alcune aziende temono le implicazioni normative sulla privacy e sulla gestione dei dati sensibili, specialmente per i settori regolamentati o B2C. Questi dati suggeriscono che la diffusione dei Digital Twin richiede non solo tecnologia, ma anche formazione, governance e supporto pubblico mirato.

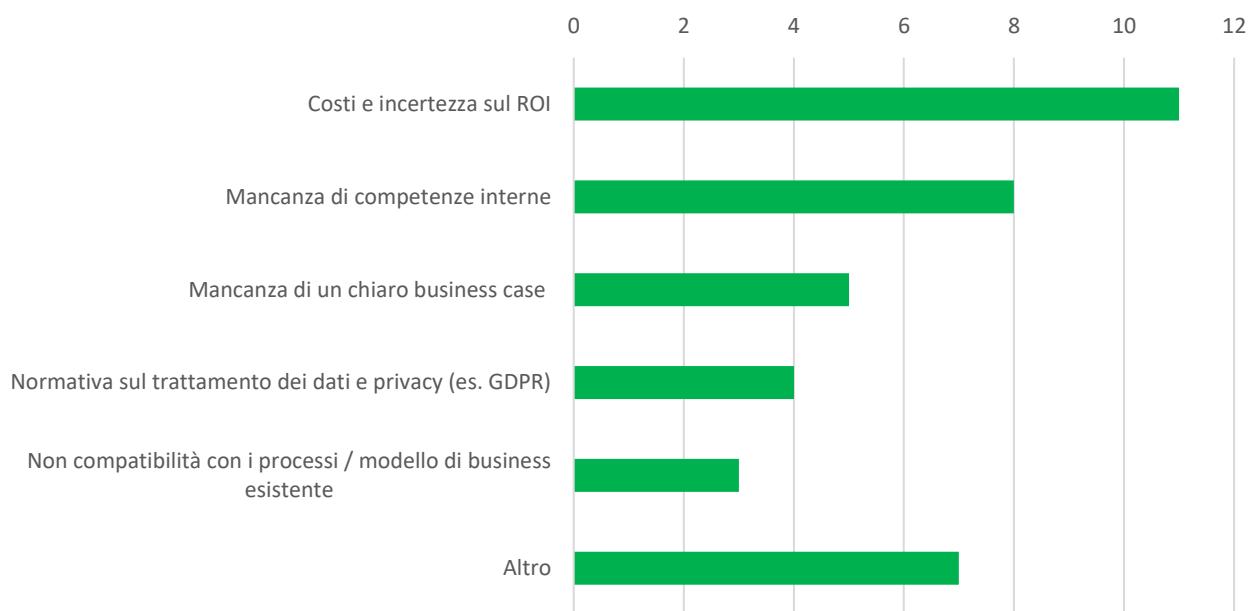


Grafico 28. Principali ostacoli all'adozione dei DT

4.4.15 Motivi per cui non si ritiene utile adottare tecnologie DT

Come si vede dal grafico 29, i principali ostacoli evidenziati da chi non considera utile il Digital Twin sono analoghi a quelli citati da chi è in fase di valutazione (domanda 53, paragrafo 4.4.14), ma con un orientamento più conservativo. La mancanza di competenze interne rappresenta la barriera più comune, segnalando una distanza tecnica e culturale rispetto alla comprensione delle potenzialità del DT. Seguono le considerazioni legate alla non compatibilità con i processi aziendali attuali, specialmente nelle imprese che operano in settori tradizionali. Le preoccupazioni sui costi e sul ritorno economico dell'investimento persistono anche qui, a conferma della necessità di chiarire meglio il valore strategico del DT alle imprese più scettiche. Alcune risposte sottolineano la mancanza di una visione strategica strutturata o i dubbi legati alla compliance normativa.

Queste evidenze indicano che per favorire l'adozione diffusa, è necessario formare i decision-maker aziendali, fornire esempi concreti e misurabili e supportare l'adozione con incentivi mirati e accompagnamento tecnico.

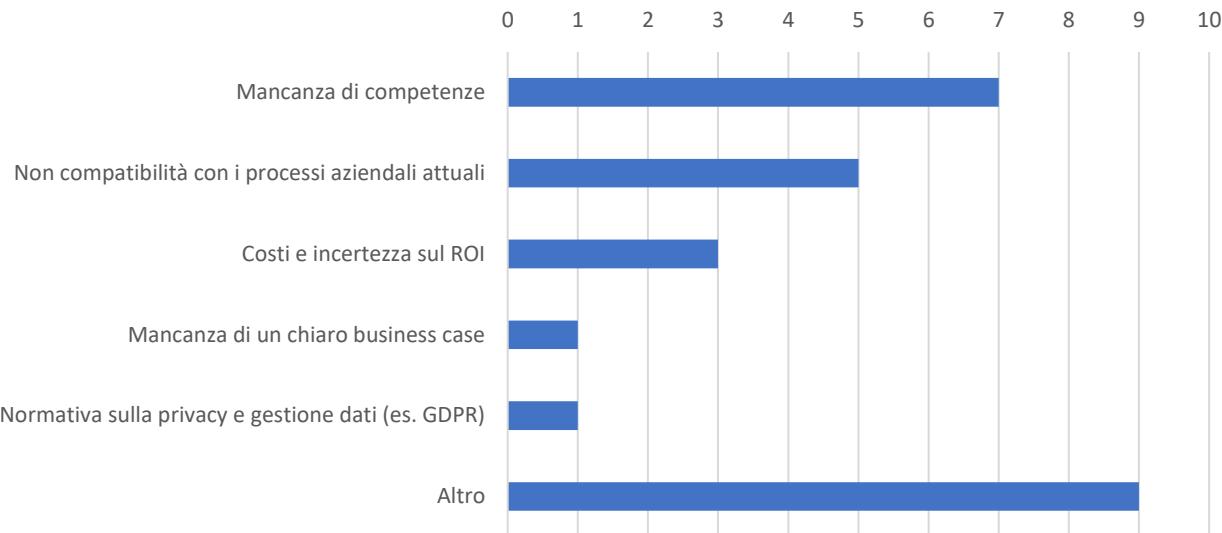


Grafico 29. Motivi per cui non si ritiene utile adottare tecnologie DT

4.4.16 Conclusioni

L'analisi delle risposte fornite dalle aziende italiane alla sezione dedicata ai Digital Twin (DT) offre una panoramica chiara e articolata del livello di maturità tecnologica, delle percezioni, delle azioni già intraprese e delle barriere che ancora ostacolano la diffusione di queste soluzioni nel tessuto industriale nazionale.

1. Conoscenza e percezione

La conoscenza generale del concetto di Digital Twin è relativamente diffusa: circa il 50% degli intervistati dichiara di averne sentito parlare, ma solo una parte minore è in grado di descriverne correttamente significato, potenzialità e ambiti di applicazione. Inoltre, le aziende riconoscono l'utilità del monitoraggio in tempo reale delle attività produttive e logistiche (domanda 42, paragrafo 4.4.4), e attribuiscono grande importanza all'integrazione di dati e sistemi (domanda 43, paragrafo 4.4.5), considerati prerequisiti per l'adozione di tecnologie DT.

2. Stato dell'implementazione

Dal punto di vista operativo, solo il 13,6% delle aziende ha già adottato soluzioni di Digital Twin, mentre il 68,2% non lo ha ancora fatto, e un altro 18,2% dichiara l'intenzione di farlo in futuro (domanda 50, paragrafo 4.4.11). Questo indica un livello di implementazione ancora embrionale, seppur con segnali di interesse crescente. Dove già utilizzati, i DT hanno prodotto benefici significativi in termini di efficienza, collaborazione, innovazione e sostenibilità (domanda 52, paragrafo 4.4.13).

3. Ambiti di applicazione attuali e futuri

Le aziende individuano numerosi ambiti applicativi futuri per i DT, sia in settori produttivi (manifattura, smart cities, sanità, infrastrutture, sostenibilità) sia in processi gestionali e decisionali interni, come operations, innovazione, logistica e strategia (domande 48–49, paragrafi 4.4.9 e 4.4.10). Questo suggerisce che il DT non è percepito solo come tecnologia di automazione industriale, ma anche come strumento trasversale di supporto al management.

4. Ostacoli all'adozione

Le barriere principali identificate sono:

- Alti costi iniziali e incertezza sul ritorno dell'investimento (ROI);
- Mancanza di competenze interne specialistiche;
- Difficoltà di integrazione con i processi esistenti;
- Scarsa chiarezza su casi d'uso concreti e
- Preoccupazioni normative (es. GDPR).

Questi ostacoli, emersi sia tra chi non ha adottato il DT (domanda 53, paragrafo 4.4.14), sia tra chi non lo ritiene utile (domanda 54, paragrafo 4.4.15), indicano la necessità di politiche di accompagnamento all'adozione, che includano formazione, consulenza, supporto tecnico e incentivi mirati.

L'indagine evidenzia che i Digital Twin sono ancora una tecnologia di nicchia, ma il potenziale percepito è elevato. Le aziende sono consapevoli della loro rilevanza, ma chiedono supporto per superare le barriere tecniche, economiche e culturali. La transizione da conoscenza a implementazione passa dunque attraverso una strategia nazionale di accompagnamento all'adozione, la formazione delle competenze digitali e la valutazione guidata dei benefici economici e organizzativi del DT nel contesto specifico di ciascuna azienda.

5. DISCUSSIONE DEI RISULTATI, IMPLICAZIONI E CONCLUSIONI

5.1 Discussione critica dei risultati

L'analisi dei dati raccolti nella sezione dedicata ai Digital Twin (DT) del questionario ha consentito di delineare un quadro realistico e aggiornato sul livello di conoscenza, implementazione e percezione di questa tecnologia nelle imprese italiane.

I risultati mostrano che la conoscenza generale del concetto di Digital Twin è discretamente diffusa: più della metà delle aziende (58,5%, domanda 39) ha dichiarato di aver sentito parlare di DT, mentre una quota più ridotta possiede una comprensione approfondita delle sue applicazioni e potenzialità (33,3%, domanda 41).

Tuttavia, quando si passa dal piano conoscitivo a quello operativo, i numeri calano sensibilmente: solo il 13,6% delle aziende del campione ha già implementato tecnologie DT nei propri processi (domanda 50), mentre il 68,2% non lo ha ancora fatto, pur manifestando un interesse futuro, il 18,2% prevede di farlo. Questi dati confermano che l'adozione dei DT in Italia è ancora in fase iniziale, in linea con quanto rilevato dall'Osservatorio Industria 4.0 del Politecnico di Milano [5.1], secondo cui solo il 20% delle imprese italiane ha avviato progetti concreti di DT, con una concentrazione maggiore nelle aziende manifatturiere di grandi dimensioni.

L'analisi delle domande 48 e 49 del questionario mostra una percezione chiara delle aree di maggiore potenziale applicativo. I settori maggiormente citati sono:

- Manifattura e processi industriali, ambito d'uso più consolidato e riconosciuto;
- Sanità, per applicazioni cliniche, diagnostiche e di modellazione predittiva;
- Smart cities e sostenibilità ambientale, con un crescente interesse per l'ottimizzazione energetica e la gestione dei sistemi complessi;
- Infrastrutture e mobilità e agricoltura, dove i DT sono visti come strumenti di gestione integrata di reti fisiche e nel monitoraggio delle condizioni ambientali e produttive.

In termini di utilità dei DT nelle attività della catena del valore e nei processi manageriali e decisionali (domanda 49), i rispondenti hanno indicato come principali aree:

- Sviluppo tecnologico e innovazione,
- Operations e produzione,
- Logistica e controllo di gestione,
- Governance e strategia e Marketing e vendite.

Queste evidenze confermano una visione dei DT come tecnologia trasversale, capace di connettere il livello operativo e quello strategico dell'impresa [178].

Le aziende che hanno già adottato i DT (domanda 52) riportano benefici significativi in termini di:

- aumento dell'efficienza operativa e miglioramento della collaborazione interna,
- riduzione dei tempi di innovazione e time-to-market,
- ottimizzazione dei KPI economici,
- manutenzione predittiva dei processi.

Questi risultati sono coerenti con i trend globali evidenziati da Markets&Markets [179], che prevede una crescita del mercato dei Digital Twin fino a 90 miliardi di dollari entro il 2030, con un CAGR (Compound Annual Growth Rate) superiore al 35%.

Tuttavia, le domande 53 e 54 mettono in luce un insieme di criticità strutturali che rallentano l'adozione. I principali ostacoli citati dalle aziende sono:

- costi elevati e incertezza sul ritorno dell'investimento (ROI), indicati dal 61% delle imprese;
- mancanza di competenze tecniche interne, menzionata da circa un terzo del campione;
- mancanza di un business case strutturato e difficoltà di integrazione con i processi aziendali esistenti;
- preoccupazioni normative legate alla privacy e alla gestione dei dati sensibili (es. GDPR).

Nel complesso, i dati raccolti confermano che la trasformazione digitale non è soltanto tecnologica, ma culturale. Il Digital Twin è percepito come una tecnologia ad alto valore strategico, ma la sua effettiva diffusione richiede competenze, governance e visione di lungo periodo.

5.2 Implicazioni per le imprese

I risultati offrono indicazioni chiare per le aziende che intendono avviare o consolidare un percorso di trasformazione digitale basato sui Digital Twin:

- Adottare un approccio graduale: iniziare da progetti pilota ad alto ritorno (es. manutenzione predittiva, ottimizzazione linee produttive) per validare il modello prima di estenderlo all'intera organizzazione.
- Investire in competenze e formazione: la carenza di professionalità specializzate rappresenta la barriera principale. È fondamentale promuovere programmi di reskilling digitale e data literacy.
- Integrare il DT con altre tecnologie abilitanti (IoT, cloud, AI, cybersecurity), creando un ecosistema digitale coeso e scalabile.
- Sviluppare strategie di data governance solide per garantire sicurezza, qualità e interoperabilità dei dati, risorsa chiave per il successo del Digital Twin.
- Promuovere una cultura dell'innovazione basata sulla sperimentazione, la collaborazione interaziendale e la condivisione di buone pratiche.

5.3 Implicazioni per i policy maker

Per i decisori pubblici e istituzionali, i dati suggeriscono le seguenti direttive prioritarie di intervento:

- Rafforzare gli incentivi fiscali e i programmi di supporto (es. *Transizione 5.0*) per sostenere gli investimenti in tecnologie DT, specialmente nelle PMI.
- Favorire la diffusione territoriale dei Competence Center e dei Digital Innovation Hub, per ridurre i divari geografici nella digitalizzazione.
- Definire standard nazionali e linee guida sull'utilizzo dei Digital Twin in chiave di sicurezza, interoperabilità e sostenibilità ambientale.
- Sostenere la formazione avanzata interdisciplinare su Digital Twin, combinando competenze di ingegneria, data science e management, come indicato anche dall'European Commission Joint Research Centre (2023) nel report *Digital Twins for the Green Transition* [180].

5.4 Limiti della ricerca

L'indagine, pur fornendo risultati coerenti e significativi, presenta alcuni limiti metodologici.

Il campione analizzato (25 aziende) non è statisticamente rappresentativo di tutto il panorama industriale italiano, ma offre una fotografia esplorativa utile per identificare tendenze e criticità.

Il metodo autovalutativo del questionario può introdurre distorsioni percettive o risposte condizionate da bias di desiderabilità sociale.

La trasversalità settoriale dei rispondenti, pur arricchendo l'analisi, non consente una lettura approfondita delle differenze tra comparti industriali.

5.5 Direzioni future di ricerca

Alla luce dei risultati ottenuti, futuri approfondimenti potrebbero concentrarsi su:

- Analisi settoriali verticali (manifattura, sanità, edilizia), per valutare le differenze di maturità e ritorno economico.
- Studi longitudinali, utili per monitorare l'evoluzione nel tempo dell'adozione e dei benefici percepiti.
- Analisi comparative internazionali, per posizionare l'Italia nel contesto europeo e globale.
- Sviluppo di indicatori di maturità digitale specifici per la misurazione del grado di implementazione dei Digital Twin.

5.6 Conclusioni finali

In sintesi, l'indagine dimostra che i Digital Twin rappresentano una leva strategica per la competitività e la sostenibilità delle imprese italiane. Le aziende ne riconoscono il valore, ma si trovano ancora in una fase di maturazione digitale. Per trasformare il potenziale in realtà servono investimenti, competenze e politiche di supporto integrate.

Come evidenziato dall'Osservatorio Industria 4.0 [177] e da Capgemini [178], il futuro dei DT sarà strettamente connesso alla capacità delle imprese di interpretare i dati, simulare scenari e prendere decisioni predittive. Il Digital Twin non è solo una tecnologia, ma un paradigma organizzativo che unisce innovazione, sostenibilità e valore economico.

La ricerca ha mostrato che, nonostante i limiti di diffusione, il percorso verso la maturità digitale è ormai avviato. Con il supporto congiunto di imprese, istituzioni e mondo accademico, i Digital Twin potranno diventare un pilastro della transizione digitale e di quella green del sistema produttivo italiano.

Bibliografia

- [1] Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0*. Frankfurt: Acatech.
- [2] Acatech – German Academy of Science and Engineering. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Securing the future of German manufacturing industry*. Frankfurt: Acatech. Recuperato da <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0/>
- [3] Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva: World Economic Forum.
- [4] Ministero dello Sviluppo Economico (MISE). (2017). *Piano Nazionale Industria 4.0*. Roma: MISE. <https://www.mimit.gov.it/it/aree-tematiche/industria40>
- [5] Ministero dello Sviluppo Economico (MISE). (2020). *Piano Transizione 4.0*. Roma: MISE.
- [6] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2020). *The Digitalisation of Science, Technology and Innovation: Key Developments and Policies*. Paris: OECD Publishing.
- [7] Draghi, M. (2021, February 18). *Replica alla Camera dei Deputati: Dichiarazioni programmatiche del Governo*. Roma: Presidenza del Consiglio dei Ministri. Recuperato da <https://www.regioni.it/newsletter/n-4009/del-19-02-2021/draghi-replica-all-camera-garantire-la-ripresa-22319/>
- [8] European Commission. (2020). Industry 4.0 in Europe: The Digital Transformation of Manufacturing. Brussels: European Commission.
Recuperato da https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/digital-industry_en
- [10] Rifkin, J. (2011). *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World*. Palgrave Macmillan
- [11] Mokyr, J. (1998). *The Second Industrial Revolution, 1870–1914*. In B. R. Weingast & D. Wittman (Eds.), *The Oxford Handbook of Political Economy* (pp. 285–324). Oxford University Press.
- [12] World Economic Forum. (2016). *Mastering the Fourth Industrial Revolution*. Davos: WEF. <https://www.weforum.org/events/world-economic-forum-annual-meeting-2016>
- [13] World Economic Forum. (2018). *Annual Meeting 2018: Creating a Shared Future in a Fractured World*. Davos: WEF. Recuperato da <https://www.weforum.org/events/world-economic-forum-annual-meeting-2018>
- [14] Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2019). *Data-driven Smart Manufacturing*. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 157–169. Recuperato da <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>
- [15] GE Digital & Vanson Bourne. (2016). *The Industrial Internet at Work: Findings from the GE Digital Industrial Evolution Index*. San Ramon, CA: General Electric Company. Recuperato da https://www.ge.com/digital/sites/default/files/download_assets/industrial-internet-at-work-report.pdf
- [16] Bentivogli, M., & Seghezzi, F. (2018). *Industria 4.0. Uomini e macchine nella fabbrica digitale*. Milano: Edizioni Adapt Press.
- [17] Lu, Y. (2017). *Industry 4.0: A Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues*. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1–10. Recuperato da <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- [18] Boschert, S., & Rosen, R. (2016). *Digital Twin – The Simulation Aspect*. In P. Hehenberger & D. Bradley (Eds.), *Mechatronic Futures* (pp. 59–74). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5

- [19] Pero, L. (2017). *Le sfide organizzative dell'Industria 4.0*. Milano: MIP Politecnico di Milano.
- [20] Istat. (2020). *Imprese e ICT: L'utilizzo delle tecnologie digitali nelle imprese italiane*. Roma: Istituto Nazionale di Statistica. Recuperato da <https://www.istat.it/it/archivio/tecnologie+digitali+imprese>
- [21] Osservatorio Industria 4.0 – Politecnico di Milano. (2019). *Industria 4.0: Il punto di vista delle imprese italiane*. Milano: School of Management, Politecnico di Milano.
Recuperato da https://www.osservatori.net/it_it/osservatori/industria-4-0
- [22] Unioncamere. (2021). *Rapporto 2021 sull'economia e l'innovazione delle imprese italiane*. Roma: Unioncamere. Recuperato da <https://www.unioncamere.gov.it/rapporti>
- [23] Pero, L., & Micelli, S. (2018). *L'innovazione organizzativa come leva della trasformazione digitale nelle PMI italiane*. In *Digital Transformation & Made in Italy* (pp. 45–68). Milano: Egea
- [24] Colombo, A. W., Karnouskos, S., Bangemann, T., Delsing, J., Stluka, P., Harrison, R., ... & Lastra, J. L. M. (2017). *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach*. Cham: Springer. Recuperato da <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50660-9>
- [25] Politecnico di Milano – Osservatori Digital Innovation. (2023). *Industria 4.0: Tecnologie e competenze per la trasformazione digitale*. Milano: School of Management, Politecnico di Milano.
https://www.osservatori.net/it_it/osservatori/industria-4-0
- [26] Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). *The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles*. NASA Technical Report. Recuperato da <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120008178/downloads/20120008178.pdf>
- [27] World Economic Forum. (2022). *Digital Twin: Real-World Applications and the Next Frontier of Data-Driven Manufacturing*. Geneva: WEF. Recuperato da <https://www.weforum.org/reports/digital-twin-real-world-applications-and-next-frontier-of-data-driven-manufacturing>
- [29] McKinsey & Company. (2021). *The Fourth Industrial Revolution and Supply Chain 4.0: Capturing Value at Scale in Manufacturing and Logistics*. New York: McKinsey Global Institute. Recuperato da <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/supply-chain-4-0>
- [30] Calenda, C. (2017). *Il Piano Nazionale Industria 4.0: Strategia e risultati attesi*. Roma: Ministero dello Sviluppo Economico. Recuperato da <https://www.mimit.gov.it/it/industria40>
- [31] Presidenza del Consiglio dei Ministri. (2016). *Legge di Bilancio 2017 – Disegno di legge n. 2611*. Roma: Presidenza del Consiglio dei Ministri. Recuperato da <https://www.governo.it>
- [32] Politecnico di Milano – Osservatori Digital Innovation. (2017). *Industria 4.0: La trasformazione digitale del manifatturiero italiano*. Milano: School of Management, Politecnico di Milano. Recuperato da https://www.osservatori.net/it_it/osservatori/industria-4-0
- [33] OECD. (2018). *Productivity and Digitalisation in Italy: Insights from the OECD Digital Economy Outlook*. Paris: OECD Publishing. Recuperato da <https://doi.org/10.1787/9789264302790-en>
- [34] Banca d'Italia. (2018). *Relazione annuale sul 2017: Innovazione e produttività nell'industria italiana*. Roma: Banca d'Italia. Recuperato da <https://www.bancaditalia.it/pubblicazioni/relazione-annuale/2018>

- [35] European Commission. (2020). *Industry 4.0 Policy in Italy: National Strategies and Digital Transformation*. Brussels: European Commission. Recuperato da https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/digital-industry_en
- [36] Agenzia delle Entrate. (2017). *Iper e Super Ammortamento – Guida alle agevolazioni per gli investimenti in beni strumentali nuovi*. Roma: Agenzia delle Entrate. Recuperato da <https://www.agenziaentrate.gov.it>
- [37] Ministero dello Sviluppo Economico (MISE). (2019). *Nuova Sabatini – Guida alle agevolazioni per gli investimenti produttivi*. Roma: MISE. Recuperato da <https://www.mimit.gov.it/it/incentivi/nuova-sabatini>
- [38] Cassa Depositi e Prestiti (CDP). (2019). *La Nuova Sabatini e il ruolo della CDP nel sostegno alle imprese*. Roma: CDP. Recuperato da <https://www.cdp.it/>
- [39] Agenzia delle Entrate. (2018). *Credito d'imposta per attività di ricerca e sviluppo: Guida operativa*. Roma: Agenzia delle Entrate. Recuperato da <https://www.agenziaentrate.gov.it/>
- [40] Agenzia delle Entrate. (2019). *Regime opzionale Patent Box: Guida operativa aggiornata*. Roma: Agenzia delle Entrate. Recuperato da <https://www.agenziaentrate.gov.it>
- [41] European Commission. (2020). *Industry 4.0 Policy in Italy: National Strategies and Digital Transformation*. Brussels: European Commission. Recuperato da https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/digital-industry_en
- [42] Ministero dello Sviluppo Economico (MISE). (2020). *Startup e PMI innovative: Linee guida e aggiornamenti normativi*. Roma: MISE. Recuperato da <https://www.mimit.gov.it/it/aree-tematiche/startup-innovative>
- [43] Unioncamere. (2021). *Rapporto 2021 sulle startup e PMI innovative in Italia*. Roma: Unioncamere. Recuperato da <https://www.unioncamere.gov.it/rapporti>
- [44] Ministero dell'Economia e delle Finanze (MEF). (2020). *Relazione sul Fondo Centrale di Garanzia per le PMI – Rapporto annuale 2020*. Roma: MEF. Recuperato da <https://www.mef.gov.it>
- [45] Ministero dello Sviluppo Economico (MISE). (2020). *Piano Transizione 4.0 – Misure fiscali e investimenti per l'innovazione*. Roma: MISE. Recuperato da <https://www.mimit.gov.it/it/aree-tematiche/transizione40>
- [46] European Commission. (2021). *Digital Compass: The European Way for the Digital Decade*. Brussels: European Commission. Recuperato da <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/digital-compass>
- [47] European Commission. (2023). *Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry*. Brussels: Directorate-General for Research and Innovation. Recuperato da https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-publications-tools-and-data/publications/all-publications/industry-50_en
- [48] World Economic Forum. (2023). *Industry 5.0: Shaping the Future of Advanced Manufacturing*. Geneva: WEF. Recuperato da <https://www.weforum.org/reports/industry-5-0-shaping-the-future-of-advanced-manufacturing>
- [49] Ministero delle Imprese e del Made in Italy (MIMIT). (2023a). *Piano Transizione 4.0: Linee guida e agevolazioni per le imprese*. Roma: MIMIT. Recuperato da <https://www.mimit.gov.it/it/aree-tematiche/transizione4>

- [50] Ministero dell'Economia e delle Finanze (MEF). (2023). *Credito d'imposta Ricerca, Sviluppo e Innovazione – Guida Operativa*. Roma: MEF. Recuperato da <https://www.mef.gov.it>
- [51] Ministero delle Imprese e del Made in Italy (MIMIT). (2023b). *Credito d'imposta Formazione 4.0 – Guida alle agevolazioni per la formazione digitale*. Roma: MIMIT. Recuperato da <https://www.mimit.gov.it/it/incentivi/formazione-4-0>
- [52] Politecnico di Milano – Osservatori Digital Innovation. (2023). *Industria e Transizione 4.0: Investimenti, Competenze e Sostenibilità*. Milano: School of Management, Politecnico di Milano. Recuperato da https://www.osservatori.net/it_it/osservatori/industria-4-0
- [53] World Economic Forum. (2023). *Industry 5.0: Shaping the Future of Advanced Manufacturing*. Geneva: WEF. Recuperato da <https://www.weforum.org/reports/industry-5-0-shaping-the-future-of-advanced-manufacturing>
- [54] Ministero dello Sviluppo Economico (MISE). (2018). *Decreto Direttoriale 1° febbraio 2018 – Avvio dei Centri di Competenza ad Alta Specializzazione*. Roma: MISE. Recuperato da <https://www.mimit.gov.it/it/normativa/decreto-direttoriale-2018-competence-center>
- [55] Politecnico di Milano – Osservatori Digital Innovation. (2019). *Industria 4.0 e Competence Center: Stato dell'arte e prospettive di sviluppo*. Milano: School of Management, Politecnico di Milano. Recuperato da https://www.osservatori.net/it_it/osservatori/industria-4-0
- [56] Invitalia. (2020). *Competence Center Industria 4.0 – Linee guida e bandi di finanziamento*. Roma: Agenzia nazionale per l'attrazione degli investimenti e lo sviluppo d'impresa. Recuperato da <https://www.invitalia.it>
- [57] European Commission. (2021). *Mapping European Digital Innovation Hubs and Competence Centers: Country Report – Italy*. Brussels: European Commission. Recuperato da <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/digital-innovation-hubs>
- [58] Ministero delle Imprese e del Made in Italy (MIMIT). (2023). *Competence Center e Digital Innovation Hub: La rete italiana per la transizione digitale e green*. Roma: MIMIT. Recuperato da <https://www.mimit.gov.it/it/aree-tematiche/competence-center>
- [59] Unioncamere. (2022). *La rete nazionale dei Competence Center e Digital Innovation Hub: Analisi e impatti territoriali*. Roma: Unioncamere. Recuperato da <https://www.unioncamere.gov.it/rapporti>
- [60] Politecnico di Milano – Osservatori Digital Innovation. (2023). *Digital Innovation Hubs e Competence Center: La rete per la trasformazione digitale delle imprese italiane*. Milano: School of Management, Politecnico di Milano
- [61] MADE Competence Center. (2020). *Presentazione del MADE – Competence Center Industria 4.0*. Milano: MADE S.c.a.r.l. Recuperato da <https://www.made-cc.eu>
- [62] Miragliotta, G. (2018, 12 febbraio). *Industria 4.0, Miragliotta (Polimi): "Uno shock positivo per la manifattura italiana"*. Agenda Digitale. Recuperato da <https://www.agendadigitale.eu/industry-4-0/industria-4-0-miragliotta-polimi-uno-shock-positivo-per-la-manifattura-italiana/>
- [63] Politecnico di Milano – Osservatori Digital Innovation. (2017). *La Grande Occasione: Rapporto 2016–2017 sull'Industria 4.0 in Italia*. Milano: School of Management, Politecnico di Milano. Recuperato da https://www.osservatori.net/it_it/osservatori/industria-4-0
- [64] Politecnico di Milano – Osservatori Digital Innovation. (2018). *Industria 4.0 in Italia: Impatti economici e prospettive di sviluppo*. Milano: School of Management, Politecnico di Milano

[65] Ministero dello Sviluppo Economico (MISE). (2020). Piano Nazionale Industria 4.0 – Rete dei Competence Center e Digital Innovation Hub. Roma: MISE.
Recuperato da <https://www.mimit.gov.it/it/aree-tematiche/industria40>

[66] MADE Competence Center. (2021a). *MADE: La Fabbrica Digitale e Sostenibile per la Trasformazione delle Imprese*. Milano: MADE S.c.a.r.l. Recuperato da <https://www.made-cc.eu/la-fabbrica-digitale-sostenibile>

[67] Politecnico di Milano – Osservatori Digital Innovation. (2021). *Competence Center e Innovazione Digitale nelle PMI Italiane*. Milano: School of Management, Politecnico di Milano. Recuperato da https://www.osservatori.net/it_it/osservatori/industria-4-0

[68] Il Sole 24 Ore. (2020, December 15). *Nasce a Milano MADE, la Fabbrica Digitale e Sostenibile del Competence Center Industria 4.0*. Il Sole 24 Ore. Recuperato da <https://www.ilsole24ore.com/art/nasce-milano-made-fabbrica-digitale-e-sostenibile-competence-center-industria-40-ADEKnLG>

[69] MADE Competence Center. (2021b). *I 20 Dimostratori Tecnologici di MADE 4.0*. Milano: MADE S.c.a.r.l. Recuperato da <https://www.made-cc.eu/dimostratori>

[70] MADE Competence Center. (2021c). *Bando MADE 2021: 22 Progetti Finanziati per l’Innovazione e la Ricerca Industriale*. Milano: MADE S.c.a.r.l. Recuperato da <https://www.made-cc.eu/news/bando-made-2021>

[71] Industria Italiana. (2021, July 20). *Made: 22 progetti ammessi al finanziamento per l’innovazione 4.0 delle PMI. Industria Italiana*. Recuperato da <https://www.industriaitaliana.it/made-competence-center-innovazione>

[72] MADE Competence Center. (2022). *MADE and ADDED Sign Strategic Cooperation Agreement on Industry 4.0*. Milano: MADE S.c.a.r.l. Recuperato da <https://www.made-cc.eu/news/made-added-abu-dhabi>

[73] Abu Dhabi Department of Economic Development (ADDED). (2022, September 15). *ADDED and MADE Sign MoU to Foster Industry 4.0 Collaboration*. Abu Dhabi: ADDED Press Office. Recuperato da <https://added.gov.ae>

[74] Politecnico di Milano – Osservatori Digital Innovation. (2022). *Osservatorio Industria 4.0: Maturità digitale e trasformazione delle imprese italiane*. Milano: School of Management, Politecnico di Milano. https://www.osservatori.net/it_it/osservatori/industria-4-0

[75] Politecnico di Milano – Osservatori Digital Innovation. (2023). *Industria 4.0 e Transizione Digitale: Rapporto 2023 sul mercato e gli investimenti italiani*. Milano: School of Management, Politecnico di Milano.

[76] Ministero delle Imprese e del Made in Italy (MIMIT). (2023). *Industria e Transizione 4.0: Dati, incentivi e andamento degli investimenti*. Roma: MIMIT. Recuperato da <https://www.mimit.gov.it/it/aree-tematiche/transizione40>

[77] EY. (2019). *Digital Manufacturing Maturity Index 2019: L’evoluzione digitale del manifatturiero italiano*. Milano: Ernst & Young Advisory S.p.A. Recuperato da https://www.ey.com/it_it/manufacturing/ey-digital-manufacturing-maturity-index-2019

[78] Unioncamere. (2022). *Rapporto Imprese e Innovazione Digitale 2022 – Il grado di digitalizzazione delle PMI italiane*. Roma: Unioncamere. Recuperato da <https://www.unioncamere.gov.it/rapporti>

[79] ISTAT. (2021). *Imprese e ICT 2021 – L’adozione delle tecnologie digitali in Italia*. Roma: Istituto Nazionale di Statistica. Recuperato da <https://www.istat.it/it/archivio/tecnologie+digitali>

- [80] Banca d'Italia. (2021). *Relazione annuale 2020 – Innovazione e produttività nelle imprese italiane*. Roma: Banca d'Italia. Recuperato da <https://www.bancaditalia.it/pubblicazioni/relazione-annuale>
- [81] OECD. (2020). *The Digitalisation of Science, Technology and Innovation: Key Developments and Policies*. Paris: OECD Publishing. Recuperato da <https://doi.org/10.1787/b9e4a2fc-en>
- [82] Pero, L. (2020). *Uomini e macchine nella fabbrica digitale: Lavoro e organizzazione nell'Industria 4.0*. Milano: Guerini Next.
- [83] FCA (Fiat Chrysler Automobiles). (2018). *World Class Manufacturing: Continuous Improvement and People Engagement in FCA Plants*. Turin: FCA Group. Recuperato da <https://www.fcagroup.com>
- [84] Stellantis. (2021). *World Class Manufacturing: Operational Excellence in a Sustainable Industry*. Amsterdam: Stellantis N.V. Recuperato da <https://www.stellantis.com>
- [85] Netland, T. H., & Powell, D. J. (2017). *The Routledge Companion to Lean Management*. London: Routledge.
- [86] Pirelli & C. S.p.A. (2020). *Pirelli Production System (PPS) – Innovazione e sostenibilità nella produzione industriale*. Milano: Pirelli & C. S.p.A. Recuperato da <https://www.pirelli.com/>
- [87] Luxottica Group. (2019). *Lean Luxottica System: Innovazione, efficienza e persone al centro*. Milano: Luxottica Press Office. Recuperato da <https://www.luxottica.com/it>
- [88] Politecnico di Milano – Osservatori Digital Innovation. (2021). *Industria 4.0 e modelli organizzativi lean nelle imprese italiane*. Milano: School of Management, Politecnico di Milano. Recuperato da https://www.osservatori.net/it_it/osservatori/industria-4-0
- [89] Politecnico di Milano – Osservatori Digital Innovation. (2023). *PMI e Transizione 4.0: Il punto sulla trasformazione digitale delle imprese italiane*. Milano: School of Management, Politecnico di Milano. Recuperato da https://www.osservatori.net/it_it/osservatori/industria-4-0
- [90] OECD. (2021). *Enhancing SME Productivity and Innovation through Digitalisation in Italy*. Paris: OECD Publishing. Recuperato da <https://doi.org/10.1787/sme-productivity-it>
- [91] European Commission. (2023). *SME Performance Review 2023: Empowering SMEs for a Sustainable and Digital Europe*. Brussels: European Commission. Recuperato da https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/sme-performance-review_en
- [92] Ministero delle Imprese e del Made in Italy (MIMIT). (2023). *Piano Transizione 4.0: Linee guida per le PMI*. Roma: MIMIT. Recuperato da <https://www.mimit.gov.it/it/aree-tematiche/transizione40>
- [93] European Commission. (2021). *Digital Transformation of SMEs: The Role of Digital Innovation Hubs*. Brussels: European Commission. Recuperato da <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/digital-innovation-hub>
- [94] Alliance Industrie du Futur. (2016). *Industrie du Futur: Rapport d'orientation stratégique*. Paris: AIF / Ministère de l'Économie et des Finances. Recuperato da <https://www.industrie-dufutur.org>
- [95] UK Government. (2017). *Industrial Strategy: Building a Britain Fit for the Future*. London: HM Government. Recuperato da <https://www.gov.uk/government/publications/industrial-strategy-building-a-britain-fit-for-the-future>
- [96] European Commission. (2021). *Shaping Europe's Digital Future – European Industrial Strategy*. Brussels: European Commission. Recuperato da https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age_en

- [97] World Economic Forum. (2020). *The Global Competitiveness Report 2020: How Countries Are Performing on the Road to Industry 4.0*. Geneva: WEF. Recuperato da <https://www.weforum.org/reports/the-global-competitiveness-report-2020>
- [98] Executive Office of the President. (2012). *Report to the President on Capturing Domestic Competitive Advantage in Advanced Manufacturing*. Washington, DC: President's Council of Advisors on Science and Technology (PCAST). Recuperato da https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast_amp_steering_committee_report_final.pdf
- [99] Manufacturing USA. (2020). *Annual Report 2020 – Strengthening U.S. Manufacturing through Innovation, Education, and Collaboration*. Washington, DC: U.S. Department of Commerce. Recuperato da <https://www.manufacturingusa.com>
- [100] National Institute of Standards and Technology (NIST). (2021). *U.S. Leadership in Advanced Manufacturing: NIST Strategy for Industry 4.0*. Gaithersburg, MD: U.S. Department of Commerce. Recuperato da <https://www.nist.gov/advanced-manufacturing>
- [101] McKinsey & Company. (2020). *The Next Normal in Manufacturing: How U.S. Manufacturers Can Thrive in a Postpandemic World*. New York: McKinsey Global Institute. Recuperato da <https://www.mckinsey.com/industries/advanced-electronics/our-insights/the-next-normal-in-manufacturing>
- [102] World Economic Forum. (2020). *The Future of Manufacturing and Production: Defining the Next Era of Industrial Growth*. Geneva: World Economic Forum. Recuperato da <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-manufacturing-and-production>
- [103] Politecnico di Milano – Osservatori Digital Innovation. (2020a). *Osservatorio Industria 4.0: La crescita del mercato e l'impatto della pandemia*. Milano: School of Management, Politecnico di Milano. Recuperato da https://www.osservatori.net/it_it/osservatori/industria-4-0
- [104] Il Sole 24 Ore. (2020, February 25). *Industria 4.0: mercato a 3,9 miliardi, cresce del 22% nel 2019*. *Il Sole 24 Ore*. Recuperato da <https://www.ilsole24ore.com/art/industria-40-mercato-39-miliardi-cresce-22percento-2019-AC6dpZB>
- [105] Unioncamere. (2020). *Le imprese italiane e l'impatto del COVID-19: Innovazione e riconversione produttiva*. Roma: Unioncamere. Recuperato da <https://www.unioncamere.gov.it/rapporti>
- [106] Tao, F., et al. (2019). *Digital Twin in Industry: State-of-the-Art and Future Directions*. MDPI, *Applied Sciences*, 9(9), 1891. <https://www.mdpi.com/2571-5577/4/2/36>
- [107] Boschert, S., & Rosen, R. (2016). *Digital Twin – The Simulation Aspect*. In *Mechatronic Futures* (pp. 59–74). Springer.
- [108] Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). *The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles*. NASA Technical Report. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120008178/downloads/20120008178.pdf>
- [109] Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). *A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems*. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948.
- [110] Grieves, M. (2014). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. White Paper, Florida Institute of Technology.

- [111] Grieves, M., & Vickers, J. (2017). *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems*. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85–113). Springer.
- [112] Siemens (2020). *Apollo 13: The First Digital Twin*. Siemens Blog, Simcenter Stories. <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin>
- [113] NASA (2021). *Digital Twins and Living Models at NASA*. NASA Technical Reports Server (NTRS). <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210023699>
- [114] PMC (2022). *Application of Digital Twins in Multiple Fields: A Review*. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 8:885294. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8852942/>
- [115] World Economic Forum (2018). *Fourth Industrial Revolution: Beacons of Technology and Innovation in Manufacturing*. Geneva: WEF.
- [116] Glaessgen E, Stargel D (2012) The Digital Twins paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. In: 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA, p 1818
- [117] Wright L, Davidson S. (2020) How to tell the difference between a model and a Digital Twins. *Adv Model and Simul in Eng Sci.*
- [118] Stark R, Damerau T (2019) Digital Twins [M]. CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 1–8
- [119] Fei T, Jiangfeng C, Qinglin Q, et al. (2018) Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data.
- [120] Digital Twin Consortium. (2023). *Definition and Framework of a Digital Twin*. Recuperato da <https://www.digitaltwinconsortium.org/initiatives/the-definition-of-a-digital-twin/>
- [121] <https://nap.nationalacademies.org/read/26894/chapter/4#24>
- [122] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). *Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification*. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022.
- [123] Qi, Q., & Tao, F. (2018). *Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison*. *IEEE Access*, 6, 3585–3593.
- [124] Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Academic Press / Elsevier. (Describe i flussi bidirezionali di dati e l'integrazione multi-livello del Digital Twin)
- [125] Boschert, S., & Rosen, R. (2016). *Digital Twin – The Simulation Aspect*. In *Mechatronic Futures* (pp. 59–74). Springer. (Chiarisce che il Digital Twin va oltre la semplice modellazione 3D)
- [126] Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). *A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems*. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948.
- [127] Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). *Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research*. *IEEE Access*, 8, 108952–108971.
- [128] Gartner Research (2022). *Digital Twin of the Customer (DToc): Key Trends in Customer Analytics*. Gartner Insights.
- [129] Lv Z., Xie S. (2021). *Artificial intelligence in the digital twins: State of the art, challenges, and future research*.

- [130] Attaran M. (2017). *The Internet of Things: Limitless opportunities for business and society*.
- [131] Researchandmarkets (2022–2027). *Digital twins market by technology, twinning type, cyber-to-physical solutions, use cases and applications in industry verticals*
- [132] Shu Z., Wan J., Zhang D. (2016), *Cloud-integrated cyber–physical systems for complex industrial applications*. pp. 865-878
- [133] Hou L., Wu S., Zhang G., Tan Y., Wang X. (2020). *Literature review of digital twins applications in construction workforce safety* p. 339
- [134] <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2019/08/12/what-is-extended-reality-technology-a-simple-explanation-for-anyone/?sh=22e4c7117249>
- [135] Danieli Automation. (2023). *Digital Twin: Smart simulation for steelmaking*. Recuperato da <https://www.danieli.com>
- Enel Green Power. (2021). *Le smart control room per gli impianti rinnovabili: il gemello digitale al lavoro*. Recuperato da <https://www.enelgreenpower.com>
- Ferrovie dello Stato Italiane – Italferr. (2023). *Digitalizzazione delle infrastrutture con BIM e Digital Twin*. FS News. Recuperato da <https://www.fsnews.it>
- IVECO. (2022). *Digitalizzazione e Industria 4.0 nella produzione dei veicoli*. CNH Industrial Press Release. Recuperato da <https://www.cnhindustrial.com>
- Leonardo S.p.A. (2023). *Digital twin e simulazione avanzata nei sistemi avionici e radar*. Recuperato da <https://www.leonardo.com>
- Tenova. (2022). *Digital Twin: Smart Furnace Performance Management*. Recuperato da <https://www.tenova.com>
- Thales Alenia Space. (2021). *Il ruolo del digital twin nello sviluppo dei moduli spaziali*. Recuperato da <https://www.thalesgroup.com>
- [136] xFarm Technologies. (2023). *Soluzioni digitali per l'agricoltura 4.0*. Recuperato da <https://www.xfarm.ag>
- Bonifiche Ferraresi. (2022). *Rapporto di sostenibilità*. Recuperato da <https://www.bonificheferraresi.it>
- Agricolus. (2023). *Digital Twin e dati per la gestione agricola sostenibile*. Recuperato da <https://www.agricolus.com>
- Elaisian. (2023). *Olivicoltura e viticoltura con Digital Twin e IoT*. Recuperato da <https://www.elaisian.com>
- Corteva Agriscience Italia. (2023). *Innovazione digitale e agricoltura di precisione*. Recuperato da <https://www.corteva.it>
- Università di Bologna. (2021). *Progetto SINTETIC – Sistemi Intelligenti per la Transizione Ecologica dell’Impresa Contadina*. Recuperato da <https://site.unibo.it/sintetic>
- [137] IRCCS San Raffaele. (2022). *Digital Twin in chirurgia cardiovascolare*. Recuperato da <https://www.hsr.it>
- Politecnico di Milano. (2021). *Progetto MeDy – Modelli dinamici per la medicina di precisione*. Recuperato da <https://www.polimi.it>

- Università di Bologna. (2023). *DTH – Digital Twin Hospital*. Recuperato da <https://site.unibo.it/dth>
- Bracco Imaging. (2022). *Personalizzazione dell'imaging con tecnologie digitali*. Recuperato da <https://www.bracco.com>
- Inpeco. (2023). *Digital Twin per la diagnostica ospedaliera automatizzata*. Recuperato da <https://www.inpeco.com>
- Engineering S.p.A. (2023). *Smart Hospitals & Digital Twin*. Recuperato da <https://www.eng.it>
- [138] Stellantis. (2023). *Smart Manufacturing e Digital Twin negli stabilimenti italiani*. Recuperato da <https://www.stellantis.com>
- Marelli. (2022). *Tecnologie digitali per la mobilità connessa e intelligente*. Recuperato da <https://www.marelli.com>
- Dallara. (2023). *Simulazione e progettazione digitale per l'automotive*. Recuperato da <https://www.dallara.it>
- Pirelli. (2022). *Cyber Tyre e Digital Twin per la guida intelligente*. Recuperato da <https://www.pirelli.com>
- FPT Industrial. (2023). *Digital Twin nel monitoraggio dei motori*. Recuperato da <https://www.fptindustrial.com>
- Italdesign. (2022). *Design virtuale e modelli predittivi per il veicolo del futuro*. Recuperato da <https://www.italdesign.it>
- [139] Leonardo S.p.A. (2023). *Simulazione e manutenzione predittiva con Digital Twin*. Recuperato da <https://www.leonardo.com>
- Thales Alenia Space. (2022). *Tecnologie digitali per l'esplorazione spaziale*. Recuperato da <https://www.thalesgroup.com>
- Avio S.p.A. (2023). *Vega e i Digital Twin per l'ottimizzazione del lanciatore*. Recuperato da <https://www.avio.com>
- CIRA. (2022). *Digital Twin e test aerospaziali avanzati*. Recuperato da <https://www.cira.it>
- Politecnico di Torino. (2022). *Ricerca sui Digital Twin applicati all'aeronautica*. Recuperato da <https://www.polito.it>
- [140] Ferrovie dello Stato – Italferr. (2023). *BIM e Digital Twin nelle infrastrutture ferroviarie italiane*. Recuperato da <https://www.fsnews.it>
- Autostrade per l'Italia. (2022). *Digitalizzazione per la sicurezza delle infrastrutture*. Recuperato da <https://www.autostrade.it>
- Italcementi. (2022). *Digital twin e sostenibilità dei materiali da costruzione*. Recuperato da <https://www.italcementi.it>
- Manens-Tifs. (2023). *Smart building e digitalizzazione in sanità e università*. Recuperato da <https://www.manens.com>
- Roma Capitale – Progetto Gemini. (2021). *Digital Twin per la gestione del patrimonio edilizio urbano*. Università La Sapienza.

[141] Enel Green Power. (2023). *Smart control room e digital twin negli impianti rinnovabili*. Recuperato da <https://www.enelgreenpower.com>

Terna. (2023). *Digital Twin per la rete elettrica nazionale*. Recuperato da <https://www.terna.it>

SNAM. (2022). *Pipeline intelligenti e simulazioni digitali per la rete del gas*. Recuperato da <https://www.snam.it>

IREN Group. (2023). *Digitalizzazione e manutenzione predittiva con Digital Twin*. Recuperato da <https://www.gruppoiren.it>

Acea. (2022). *Smart water management e digital twin per reti idriche urbane*. Recuperato da <https://www.gruppo.acea.it>

RSE. (2022). *Ricerca e simulazione energetica avanzata con gemelli digitali*. Recuperato da <https://www.rse-web.it>

[142] Italmatch Chemicals. (2023). *Digitalizzazione dei processi chimici industriali*. Recuperato da <https://www.italmatch.com>

Sardegna Ricerche. (2022). *Progetti per la valorizzazione di siti minerari dismessi*. Recuperato da <https://www.sardegnaricerche.it>

ENI. (2023). *Gemelli digitali per la gestione dei giacimenti e la manutenzione offshore*. Recuperato da <https://www.eni.com>

Solvay. (2023). *Industria 4.0 e Digital Twin per il controllo degli impianti chimici*. Recuperato da <https://www.solvay.it>

Università di Bologna – DICAM. (2022). *Progetti di ricerca su Digital Twin e modellazione geotecnica*. Recuperato da <https://dicam.unibo.it>

[143] Capgemini Research Institute. (2023). *Digital Twins in Retail: Bridging Physical and Digital Customer Experiences*. Capgemini.

Calzedonia Group. (2023). *Sustainability Report 2023*. Calzedonia S.p.A.

Deloitte. (2022). *Retail Reloaded: The Digital Twin as a Lever for Supply Chain Optimization*. Deloitte Insights.

IBM. (2022). *AI and Digital Twin Solutions for Retail Analytics*. IBM Global Business Services.

Osservatorio Innovazione Digitale nel Retail – Politecnico di Milano. (2023). *Report Annuale 2023: L'evoluzione digitale del punto vendita in Italia*. School of Management, Politecnico di Milano.

Osservatorio Retail Transformation – Politecnico di Milano. (2023). *Dati, esperienze e nuove tecnologie nel retail omnicanale*. Politecnico di Milano.

ShopFully. (2023). *Company Insights: Digital Twin Simulation for Retail Promotion Optimization*. ShopFully Italia S.r.l.

[144] <https://en.wikipedia.org/wiki/ShopFully>

[145] <https://www.txone.com/blog/digital-twins-benefits-and-challenges-revolutionary-technology-in-automotive-industries>

- [146] Liu, H., Zhang, B., Wu, V., Yang, X., & Wang, L. (2025) Review of Digital Twin in the Automotive Industry on Products, Processes and Systems. *International Journal of Automotive Manufacturing and Materials*.
- [147] Chow A. R. (2021), Time.com, *How Digital Twins Are Transforming Manufacturing, Medicine and More.* <https://time.com/6131320/digital-twins-uses>
- [148] <https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/discover/2019/how-digital-twin-technology-can-enhance-aviation.aspx>
- [149] <https://www.aerospacetestinginternational.com/features/how-digital-twins-are-transforming-aerospace-development-and-testing.html>
- [150] <https://www.the-sun.com/money/13304708/walmart-ceo-john-furner-nrf-inflation-ai-digital-twin>
- [151] <https://www.businessinsider.com/lowes-ai-retail-store-layout-product-trends-customer-experience-2025-7>
- [152] https://www.digitalexperience.live/digital-twins-transforming-cx-2024?utm_source=chatgpt.com
- [153] <https://mobidev.biz/blog/digital-twin-technology-retail-benefits-use-cases-implementation-approaches>
- [154] Deloitte. (2022). *Digital Twins in Healthcare: Driving better patient outcomes.* Recuperato da <https://www.deloitte.com>
- [155] National Institute of Building Sciences (2015), *National BIM Standard-United States Version 3. in Section 4.2: Construction Operation Building Information Exchange*
- [156] Karan E.P., Irizarry J. (2015), *Extending BIM interoperability to preconstruction operations using geospatial analyses and semantic web services*
- [157] Tang S., Shelden D.R., Eastman C.M., Pishdad-Bozorgi P., Gao X. (2019), *A review of building information modeling (BIM) and the Internet of Things (IoT) devices integration: Present status and future trends*
- [158] De-Graft J.O., Perera S., Osei-Kyei R., Rashidi M. (2021), *Digital twin application in the construction industry: A literature review*
- [159] Anglo American. (2022). *Digital Mine initiative.* Recuperato da <https://www.angloamerican.com>
- [160] BHP. (2022). *Digital Twin implementation in mining logistics.* Recuperato da <https://www.bhp.com>
- [161] GE Digital. (2021). *Digital Twin technology for thermal power plants.* Recuperato da <https://www.ge.com/digital>
- [162] Markets and Markets. (2022). *Digital Twin Market by Industry - Global Forecast to 2030.* Recuperato da <https://www.marketsandmarkets.com>
- [163] USDA, E. (2020). What is Agriculture's Share of the Overall US Economy? <https://www.ers.usda.gov/data-products/chart-gallery/gallery/chart-detail/?chartId=582>
- [164] Hatfield, J., Takle, G., Grotjahn, R., Holden, P., Izaurralde, R. C., Mader, T., ... & Liverman, D. (2014). Ch. 6: Agriculture. *Climate Change Impacts in the United States: The Third National climate Assessment, JM Melillo, Terese (TC) Richmond, and GW Yohe, Eds., US Global Change Research Program, 150-174*

- [165] ICE (2024). Rapporto annuale sull'internazionalizzazione delle imprese italiane.
- [166] Wang, T., Zhang, C., & Yang, H. (2021). Digital Twin for Smart Manufacturing: International Perspectives and Applications. *IEEE Access*, 9, 78564–78577.
- [167] Porter, M. E. (1985). *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*. Free Press.
- [168] Christopher, M. (2016). *Logistics & Supply Chain Management* (5th ed.). Pearson.
- [169] Kraljic, P. (1983). "Purchasing Must Become Supply Management." *Harvard Business Review*, Sept–Oct.
- [170] Regolamento Generale sulla Protezione dei Dati (GDPR), Regolamento UE 2016/679
- [171] Clusit – Rapporto sulla Sicurezza ICT in Italia 2024, www.clusit.it
- [172] MEF – Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, Missione 1 – Componente 2
- [173] Unioncamere – Rapporto “Competenze Digitali nelle PMI”, edizione 2023
- [174] Osservatorio Industria 4.0 – Politecnico di Milano. (2024). *Rapporto sull'adozione delle tecnologie digitali nelle imprese italiane*. Politecnico di Milano, School of Management.
- [175] MarketsandMarkets. (2023). *Digital Twin Market by Application, Industry, and Region - Global Forecast to 2030*. MarketsandMarkets Research.
- [176] Capgemini Research Institute. (2023). *Digital Twins: Adding Intelligence to the Real World*. Capgemini.
- [177] Osservatorio Industria 4.0 – Politecnico di Milano. (2024). *Rapporto sull'adozione delle tecnologie digitali nelle imprese italiane*. School of Management, Politecnico di Milano.
- [178] Capgemini Research Institute. (2023). *Digital Twins: Adding Intelligence to the Real World*. Capgemini.
- [179] MarketsandMarkets. (2023). *Digital Twin Market by Application, Industry, and Region – Global Forecast to 2030*. MarketsandMarkets Research.
- [180] European Commission Joint Research Centre (JRC). (2023). *Digital Twins for Green Transition*. Publications Office of the European Union.
- [181] Attaran M., Celik B. (2023). *Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities*. Decision Analytics Journal. Elsevier.

ALLEGATO 1

Il questionario presenta quattro diverse tipologie di domande: domande a risposta singola, domande a risposte multiple, domande a risposte aperte e domande basate su scale Likert.

Struttura del questionario

Il questionario è caratterizzato da 54 domande suddivise nelle seguenti 4 sezioni:

- █ Sezione 1 (domande da 1 a 17). Profilo dell'azienda e del rispondente;
- █ Sezione 2 (domande da 18 a 34). Livello di conoscenza dei concetti afferenti al paradigma Industria 4.0;
- █ Sezione 3 (domande da 35 a 38). Implementazione effettiva dei concetti di Industria 4.0
- █ Sezione 4 (domande da 39 a 54). Conoscenza, implementazione e utilizzo dei Digital Twin

1.1 Questionario

PROFILO AZIENDA RISPONDENTE

1. Ragione sociale dell'Azienda

2. Carica del rispondente nell'organigramma aziendale

3. Settore di appartenenza dell'azienda

- Automotive
- Chimica e materiali
- Commercio e finanza
- Consulenza
- Edilizia
- Education and entertainment
- Elettronica
- Farmaceutico, sanitario, bio-tech
- Food and beverage
- ICT
- Logistica, trasporti e stoccaggio
- Metalmecanico
- Tessile
- Utilities (energia, gas, acqua, ecc.)
- Altro

4. In quale ambito è attiva l'Azienda?

- Manifattura
- Servizi
- Altro

5. Dimensione aziendale (numero di dipendenti)

- Minore di 10
- Compreso tra 10 e 49
- Compreso tra 50 e 249
- Maggiore di 249

6. Dimensione aziendale (fatturato espresso in milioni di euro)

- Minore di 0.5
- Compreso tra 0.5 e 2
- Compreso tra 2 e 10
- Compreso tra 10 e 50
- Maggiore di 50

7. Mercati serviti

- Nazionali
- Internazionali

8. Anno di fondazione

9. Vende in modo diretto o su commessa?

- Vendita diretta
- Per commessa

10. Ha 1 o più fornitori principali (almeno il 30% delle materie prime/semilavorati)?

- Sì
- No

11. Quanti fornitori principali ha?

- 1-3
- 4-10
- 11-20
- Maggiore di 20

12. Quale percentuale del fatturato è generata dai suoi clienti più importanti?

- Minore del 25%
- Compreso tra il 25% e il 50%
- Compreso tra il 50% e il 75%
- Maggiore del 75%

13. In quale settore di mercato opera il suo cliente principale?

- PMI
- Grande impresa
- Vendita al dettaglio

14. Qual è la percentuale di mercato detenuta dall'Azienda a livello nazionale?

- Minore del 5%
- Dal 5% al 10%
- Dal 10% al 20%
- Dal 20% al 30%
- Dal 30% al 50%
- Maggiore del 50%
- Non sa/non risponde

15. Gli ordini possono essere influenzati da picchi o da fluttuazioni stagionali?

- Si verificano picchi di domanda imprevisti
- Si verificano picchi di domanda stagionali
- Non si verificano picchi di domanda o fluttuazioni stagionali
- Non sa/non risponde

16. Come gestisce l'Azienda i periodi di picco o le fluttuazioni stagionali?

- Si utilizzano margini di capacità produttiva (solitamente la capacità produttiva non è utilizzata al 100%)
- Si aumenta la capacità produttiva (straordinari, inserimento di forza lavoro stagionale, lavoro su più turni, lavoro festivo)
- Si esternalizza parte della produzione
- Non sa/non risponde

17. L'Azienda ha preso parte a iniziative per lo sviluppo tecnologico e l'innovazione, come bandi, progetti o finanziamenti?

- Si
- No
- Non so

LIVELLO DI CONOSCENZA INDUSTRIA 4.0

18. Ha mai sentito parlare di Industria 4.0?

- Si
- No

19. Dove ne ha sentito parlare?

- Riviste scientifiche
- Seminari/conferenze/fiere
- Passaparola di settore
- Web
- Non ricordo
- Altro

20. Indichi per ciascuna delle seguenti tecnologie il suo livello di conoscenza

	Molto basso	Basso	Medio	Alto	Molto alto
Big Data Analytics	<input type="checkbox"/>				
Cloud	<input type="checkbox"/>				
Internet of Things	<input type="checkbox"/>				
Realtà virtuale	<input type="checkbox"/>				
Robotica e Intelligenza Artificiale	<input type="checkbox"/>				
Sensori smart	<input type="checkbox"/>				
Sistemi Cyberfisici (CPS Cyber Physical System)	<input type="checkbox"/>				
Sistemi di sicurezza cibernetica (CSS Cyber Security System)	<input type="checkbox"/>				
Stampa 3d, Additive Manufacturing	<input type="checkbox"/>				
Wearable e dispositivi smart	<input type="checkbox"/>				

Internet of Things: rete di oggetti fisici che sono connessi a Internet e che possono comunicare tra di loro e con altri sistemi tramite sensori, software e altre tecnologie integrate.

Cyber Physical Systems: sistemi integrati che combinano componenti fisici e digitali per interagire con l'ambiente e prendere decisioni autonome o semi-autonome. Questi sistemi includono sensori, attuatori, reti di comunicazione e software per monitorare e controllare processi fisici, trasformando i dati raccolti in azioni concrete.

Cyber Security Systems: insieme di tecnologie, processi e pratiche progettate per proteggere le reti, i dispositivi, i programmi e i dati da attacchi, danni o accessi non autorizzati.

Stampa 3D: tecnologia di manifattura che consente di creare oggetti tridimensionali partendo da un modello digitale. Utilizzando diversi materiali, come plastica, metallo, resina, e persino ceramica o biomateriali, una stampante 3D costruisce l'oggetto strato per strato seguendo le istruzioni fornite da un file CAD.

Big Data Analytics: processo che esamina grandi e variabili insiemi di dati (big data) per scoprire modelli nascosti, correlazioni sconosciute, tendenze di mercato, preferenze dei clienti e altre informazioni utili.

Realtà virtuale: è una tecnologia che utilizza dispositivi informatici per creare un ambiente simulato, immersivo e interattivo, che può replicare un mondo reale o inventato.

Wearable: sono dispositivi elettronici che possono essere indossati sul corpo o integrati in abiti e accessori come smart watch, fitness tracker, smart glasses

21. È a conoscenza dei bandi/finanziamenti erogati da enti/fondi a favore dello sviluppo tecnologico e dell'implementazione delle tecnologie coerenti con il paradigma Industria 4.0?

- Si
- No

22. Di quali è a conoscenza? (Rispondere solo se domanda 21=Si)

23. È riuscito ad usufruire degli incentivi proposti dalla legge Calenda/Nuova Sabatini?

- Si
- No

24. È a conoscenza delle normative europee sulla gestione dati GDPR?

- Si
- No

25. Quali fra le seguenti azioni ha attuato o intende mettere in atto per adeguarsi alla normativa?

(Rispondere solo se domanda 24=Si)

- Assumere un DPO (Data Protection Officer, responsabile dati)
- Fornire strumenti di consenso aggiornati con le nuove normative
- Garantire un alto livello di protezione e sicurezza per i dati che varcano i confini nazionali
- Gestire un archivio di dati sensibili (carte di credito, informazioni sulla salute) in un luogo molto sicuro
- Informare l'utente/cliente riguardo alle finalità del trattamento dei suoi dati personali e la profilazione alla quale sarà soggetto
- Monitorare costantemente la gestione degli accessi e i permessi ai dati

26. Nel concetto di industria 4.0 spesso si fa riferimento a servizi esterni che coinvolgono l'utilizzo di dati della sua azienda. Considera la possibilità di permettere l'accesso a questi dati?

- Si
- No
- In parte

27. Per quali motivi?

- Diffidenza nei confronti di chi li gestisce
- I dati sono personali dell'azienda e solo chi ne fa parte può averne accesso
- Non vedo vantaggi economici nella condivisione di questi
- Scarsa sicurezza dei dati

28. Per le seguenti tipologie di dato quale grado di accessibilità da esterni o condivisione reputa più adeguato?

	Inaccessibile	Parzialmente accessibile su richiesta	Totalmente accessibile su richiesta	Libero accesso
Dati legati a specifiche di produzione	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dati legati alla logistica	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dati di monitoraggio del flusso di produzione	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dati sensibili di profilo cliente	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

29. È a conoscenza dei criteri di sicurezza riguardo i dati informatici e alle tematiche in ambito Cybersecurity

- Si
- No

30. Quali fra queste tecniche di sicurezza informatica sono state adottate?

- Formazione del personale in ambito Cybersecurity (formare, ad esempio, il personale su come accedere ai dati aziendali secondo criteri prestabiliti)
- Nessuna delle soluzioni indicate corrisponde al mio attuale livello di protezione
- Reti aziendali chiuse con sistemi antintrusione e firewall
- Server interni aziendali con accessi controllati con funzioni di backup custoditi in ambienti sicuri

31. È a conoscenza delle soluzioni Cloud, come ad esempio i servizi SaaS (Software as a Service, come ad esempio Dropbox, Google Drive)?

- Si
- No

32. Adotta soluzioni Cloud attualmente per le attività che coinvolgono l'Azienda?

- Si
- No

33. In riferimento alle risposte date alle domande precedenti, in relazione alla gestione dei dati dell'azienda, sarebbe disponibile alla condivisione di dati per servizi Cloud?

- Si
- No
- Non so

34. Considera la sicurezza informatica offerta dai gestori dei servizi Cloud (come, ad esempio, servizi di salvataggio dei dati) più vulnerabile rispetto ai sistemi di protezione implementati in azienda (server aziendali)?

- Si
- No

IMPLEMENTAZIONE EFFETTIVA CONCETTI DI INDUSTRIA 4.0

35. Quali, tra le seguenti attività, ritiene importanti per il suo business?

- Allocazione di risorse ad attività di ricerca e sviluppo
- Attrarre manager per governare innovazione e digitalizzazione
- Attrarre risorse esperte di meccatronica
- Automazione dei processi produttivi
- Flessibilità organizzativa e predisposizione al cambiamento
- Formalizzazione di un approccio strategico per incentivare l'innovazione
- Formazione sul campo dei dipendenti su utilizzo e gestione dei nuovi strumenti digitali
- Integrazione orizzontale (espansione delle attività dell'impresa a prodotti, processi, know-how affini alla filiera già esistente) tramite protocolli standard di comunicazione
- Integrazione verticale (internalizzazione delle fasi a monte/a valle della filiera in cui già opera l'Azienda) tramite protocolli standard di comunicazione
- Manutenzione preventiva e predittiva
- Offerta di servizi in supporto ai prodotti fisici
- Produzione di piccoli lotti fortemente customizzati
- Progettazione dei prodotti assistita dal calcolatore/strumenti di simulazione
- Raccolta ed analisi di dati sulle attività in essere
- Sostenibilità ambientale e risparmio energetico
- Uso di Robot collaborativi (COBOT)

36. Indichi dalla seguente lista di tecnologie il grado di effettiva implementazione di ciascuna di esse, facendo riferimento alla relativa definizione

	Molto basso	Basso	Medio	Alto
Big Data Analytics	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dati o software in Cloud	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Internet of Things	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Realtà virtuale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Robotica e Intelligenza Artificiale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sensori smart	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sistemi Cyberfisici (CPS Cyber Phisical System)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sistemi di sicurezza cibernetica (CSS Cyber Security System)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Stampa 3d, Addictive Manufacturing	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wearable e dispositivi smart	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

37. Indichi i benefici attesi dall'implementazione delle tecnologie già in uso e di quelle che si è predisposti ad adottare

- Aumento della qualità dei prodotti/processi
- Aumento della sicurezza dei lavoratori
- Aumento della trasparenza nelle attività svolte dai vari attori della filiera
- Aumento di affidabilità dei prodotti/processi
- Aumento di efficienza
- Aumento di produttività
- Interoperabilità tra i vari attori, sincronizzazione e scambio di informazioni
- Livellamento dei carichi energetici e riduzione utilizzo energia
- Maggiore soddisfazione dei consumatori
- Miglioramento del processo decisionale
- Miglioramento del processo di controllo del ciclo di vita del prodotto
- Realizzazione di prodotti customizzati in piccoli lotti
- Riduzione dei costi
- Riduzione delle tempistiche (es.: time-to-market, set-up)
- Altro

38. Esiste in Azienda un piano strategico di azioni formalizzate al fine di favorire l'innovazione?

- Per nulla
- È in fase di sviluppo
- È attualmente in atto

CONOSCENZA, IMPLEMENTAZIONE E UTILIZZO DEI DIGITAL TWIN (DT)

I **Digital Twin (DT)** rappresentano una tecnologia rivoluzionaria nell'industria manifatturiera, consentendo una maggiore integrazione tra il mondo fisico e quello digitale. Attraverso la simulazione e l'analisi dei dati, le aziende possono migliorare i loro processi, ridurre i costi e offrire prodotti di alta qualità, creando un vantaggio competitivo significativo. Tuttavia, l'implementazione di gemelli digitali richiede un investimento significativo in infrastrutture e competenze, insieme a un'attenzione costante alla sicurezza dei dati.

39. Sulla base della descrizione sopra, ha mai sentito parlare di Digital Twin?

- Si
- No

40. Quali tecnologie digitali usate nella vostra azienda?

- Big Data e Intelligenza Artificiale
- Cloud
- High Performance Computing
- Internet of Things
- Realtà aumentata
- Robotica e automazione
- Altro

41. Conoscete il significato e la potenzialità delle tecnologie di Digital Twin?

- Si, conosco la tecnologia e i suoi utilizzi
- Si, ne ho sentito parlare ma non ho ben chiaro gli ambiti di utilizzo
- No, non ne ho mai sentito parlare

42. Reputa utile, per la sua attività, la possibilità di avere informazioni in tempo reale sullo stato dei propri macchinari, dell'intera linea produttiva e sulle attività svolte dai dipendenti?

- Si
- No

43. Quale importanza dà alle seguenti implementazioni?

	Per nulla importante	Poco importante	Mediamente importante	Importante	Molto importante	Non applicabile
Informazioni in tempo reale sullo stato dei macchinari o dell'intera linea produttiva	<input type="checkbox"/>					
Informazioni in tempo reale sulle attività svolte dai dipendenti	<input type="checkbox"/>					
Dati raccolti in cloud e consultabili da qualsiasi computer connesso alla rete ed eventualmente da smartphone	<input type="checkbox"/>					
Possibilità di sfruttare i dati raccolti in tempo reale per effettuare delle simulazioni matematico-statistiche sui processi produttivi col fine di efficientare la produzione e le risorse impiegate	<input type="checkbox"/>					
Condividere alcune delle informazioni raccolte con i suoi fornitori al fine di schedulare meglio le proprie attività produttive	<input type="checkbox"/>					
Condividere in modo automatico alcune delle informazioni raccolte (ad esempio stato dettagliato di produzione di una commessa) con i suoi clienti al fine di rendere più trasparenti i rapporti di business	<input type="checkbox"/>					
Possibilità di registrare e certificare in modo automatico/semiautomatico tutte le lavorazioni o attività necessarie alla produzione ed eventualmente previste dal contratto	<input type="checkbox"/>					
Possibilità di ricevere suggerimenti e indicazioni automatici riguardo la conformità dei processi/lavorazioni rispetto alle norme ISO di settore	<input type="checkbox"/>					
Analisi predittive, sui dati raccolti, volte a segnalare la	<input type="checkbox"/>					

data futura di guasto dei macchinari

Analisi predittive, sui dati raccolti, volte a segnalare l'impossibilità di consegnare una commessa in tempo

44. Tutti i benefici dei Digital Twin sono ad oggi oggetto di incentivi statali riguardo l'Industria 4.0. Sarebbe disposto ad investire su tali implementazioni?

- Si, sono interessato alla tecnologia e prevedo entro un breve periodo di implementarlo
- Si, sono interessato ma preferirei vedere i risultati di casi d'uso che lo implementano
- No, non reputo sia una tecnologia utile

45. Negli ultimi 3 anni ha effettuato investimenti in Industria 4.0?

- Si
- No

46. Ha avuto dei miglioramenti effettivi, anche in termini di aumento di fatturato?

- Si
- No

47. Se ha effettuato o pensa di effettuare investimenti nell'Industria 4.0, in che lasso di tempo si aspetta di averne un ritorno economico?

- Breve periodo
- Medio periodo
- Lungo periodo

48. Quali sono i settori in cui il Digital Twin potrà trovare nuovi ambiti di applicazione?

- Agricoltura
- Banking e finance
- Infrastrutture e mobilità
- Manifattura e processi industriali
- Metaverso
- Personal Digital Twin (copia digitale dell'individuo)
- Sanità
- Smart cities
- Sostenibilità e transizione verde
- Altro

49. In quali attività della catena del valore e processi manageriali e decisionali manifesta la propria utilità il Digital Twin?

- Approvvigionamento e fornitura
- Controllo di gestione (HR, finance, amministrazione, ecc.)
- Governance e strategia
- Logistica
- Marketing e vendite
- Operations e produzione
- Sviluppo tecnologie e innovazione
- Altro

50. Avete già implementato tecnologie di Digital Twin nei vostri processi?

- Si
- No
- No, ma lo abbiamo in programma

51. Quali sono gli ambiti in cui il Digital Twin potrà trovare nuovi spazi di applicazione?

- Accelerazione dei processi di innovazione e del time to market
- Aumento dell'efficienza di prodotto/processo e la collaborazione tra team
- Aumento della sostenibilità
- Manutenzione predittiva e aumento della vita operativa degli asset
- Miglioramento dei KPI economici
- Simulazione e risk management
- Soddisfazione del cliente e CRM
- Altro

52. Quali sono i principali benefici che il Digital Twin ha portato alla sua azienda?

- Accelerazione dei processi di innovazione e del time to market
- Aumento dell'efficienza di prodotto/processo e la collaborazione tra team
- Aumento della sostenibilità
- Manutenzione predittiva e aumento della vita operativa degli asset
- Miglioramento dei KPI economici
- Simulazione e risk management
- Soddisfazione del cliente e CRM
- Altro

53. Quali sono i principali ostacoli all'adozione del Digital Twin?

- Costi e incertezza sul ROI
- Mancanza di competenza
- Mancanza di un chiaro business case
- Non è compatibile con i nostri processi o attività di business
- Normativa sul trattamento dei dati e privacy
- Altro

54. Per quale ragione non ritiene utile l'adozione di tecnologie Digital Twin?

- Costi e incertezza sul ROI
- Mancanza di competenza
- Mancanza di un chiaro business case
- Non è compatibile con i nostri processi o attività di business
- Normativa sul trattamento dei dati e privacy
- Altro