

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Gestionale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

Paradigmi tecnologici Industry 4.0 e Industry 5.0 dal punto di vista della Qualità: requisiti, differenze e criticità



Politecnico di Torino

Relatore

Prof. Fiorenzo Franceschini

Candidato

Roberto Scorza

Luglio 2024

Indice

Indice degli acronimi	I
Indice delle figure	II
Indice delle tabelle	IV
1. Introduzione	1
2. Le Rivoluzioni Industriali: Storia e Sviluppi tecnologici.....	3
2.1. Prima Rivoluzione Industriale	3
2.2. Seconda Rivoluzione Industriale	7
2.3. Terza Rivoluzione Industriale.....	10
3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)	15
3.1. Definizione e caratteristiche	15
3.2. Tecnologie abilitanti: i nove “pilastri” dell’Industria 4.0	18
3.2.1. Industrial Internet of Things	21
3.2.2. Big Data and Analytics	24
3.2.3. Cloud Computing	27
3.2.4. Additive Manufacturing	32
3.2.5. Augmented Reality	34
3.2.6. Cyber-Security	36
3.2.7. Autonomous Robots	38
3.2.8. Simulation.....	41
3.2.9. Horizontal/Vertical System Integration	43
4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)	45
4.1. Definizione e caratteristiche	45
4.2. Principi fondanti dell’Industria 5.0.....	50
4.2.1. Human Centricity	51
4.2.2. Sustainability	54
4.2.3. Resilience	55
4.3. Tecnologie abilitanti	56
4.3.1. Esempi Industria 5.0	60
4.4. Società 5.0	64
5. Diffusione dei paradigmi e delle tecnologie	69
5.1. Trasformazione digitale	69
5.2. Additive Manufacturing	75
5.3. Intelligenza artificiale e robotica	77
5.4. Internet of things.....	80

5.5.	Virtual ed Augmented Reality	82
6.	Industria 4.0 vs Industria 5.0: il concetto di Qualità all'interno dei due paradigmi.....	85
6.1.	Evoluzione del concetto di Qualità.....	85
6.2.	Qualità 4.0	88
6.3.	Qualità 5.0	92
7.	Conclusioni.....	97
8.	Bibliografia e Sitografia	101

Indice degli acronimi

AI Artificial Intelligence
AM Additive Manufacturing
AR Augmented Reality
ASTM American Society for Testing and Materials
CAD Computer Aided Design
CPPS Cyber-Physical Production Systems
CPS Cyber-Physical System
CPSoS Cyber-Physical Systems of Systems
EC Edge Computing
HRC Human-Robot Collaboration
IAAS Infrastructure as a Service
ICT Information and Communication Technologies
IIOT Industrial Internet of Things
IOE Internet of Everything
IOT Internet of Things
ITU International Telecommunications Union
NIST National Institute of Standards and Technology
NSF National Science Foundation
PAAS Platform as a Service
RFID Radio Frequency Identification
SAAS Software as a Service
SAN Storage Area Network
SCM Supply Chain Management
TQM Total Quality Management
WSN Wireless Sensor Network

Indice delle figure

Figura 1: Macchina a vapore di James Watt (Wikipedia, Macchina a vapore di James Watt, 2024).....	4
Figura 2: Industria tessile (S.U., 2024).....	5
Figura 3: Linea di montaggio mobile di Henry Ford (alevanni, 2024)	8
Figura 4: i fratelli Wright e l'invenzione dell'aeroplano (Metropolitan, 2024).....	9
Figura 5: l'ENIAC al Ballistic Research Laboratory (Wikipedia, ENIAC, 2024).....	12
Figura 6: Robot UNIMATE (ROBOTS, 2024)	13
Figura 7: Smart Factory (Tecno4Industry, 2024)	17
Figura 8: l'Industria 4.0 sta cambiando le tradizionali relazioni di produzione (Rubmann, et al., 2015).....	19
Figura 9: le nove tecnologie che stanno trasformando la produzione industriale (Rubmann, et al., 2015).....	20
Figura 10: Internet of Things (IoT) (Todorovich, 2024)	22
Figura 11: il Cloud Computing (LaNotiziaWeb, 2024).....	28
Figura 12: i modelli di servizio del Cloud (PrimeIT, 2024)	30
Figura 13: Processo di fabbricazione con Additive Manufacturing (Gebhardt, 2011).....	33
Figura 14: esempio di Augmented Reality presso la compagnia SAP (Horejsi, 2015).....	35
Figura 15: differenze tra robot tradizionali e cobots (Giacobone, 2024)	40
Figura 16: le tre componenti del Digital Twin (Grieves, 2015)	42
Figura 17: i principi 6R (Rada, INDUSTRY 5.0 definition, 2017)	47
Figura 18: Principi fondanti dell'Industria 5.0 (Xu, Lu, Vogel-Heuser, & Wang, 2021)....	51
Figura 19: le dieci competenze identificate all'interno del World Manufacturing Forum Report (Foundation, 2019)	54
Figura 20: Tecnologie abilitanti dell'Industria 5.0 (Maddikunta, et al., 2022)	56
Figura 21: esempi di applicazioni industriali 5.0 (Maddikunta, et al., 2022).....	61
Figura 22: dalla Società 1.0 alla Società 5.0 (Federation, 2016).....	65
Figura 23: i "cinque muri" della Società 5.0 (Hitachi, 2017).....	67
Figura 24: Rivoluzioni Industriali (He, et al., 2024)	69
Figura 25: Spesa mondiale per la trasformazione digitale 2017-2027 (Statista, 2024).....	71
Figura 26: Tasso di adozione delle tecnologie emergenti a livello mondiale (Statista, Digital transformation, 2024)	71
Figura 27: Digital Compass 2030 (Sapuppo, 2024)	73
Figura 28: dimensioni e indicatori DESI (Commission, Digital Economy and Society Index (DESI) 2022, 2022)	74
Figura 29: Digital Economy and Society Index, 2022 (Commission, Digital Economy and Society Index (DESI) 2022, 2022)	75
Figura 30: Mercato globale dell'Additive Manufacturing in miliardi di dollari (Hoffmann & Mehta, 2024) *(1) CAGR: Tasso medio di crescita nel tempo	76
Figura 31: Dimensione del mercato globale della robotica industriale 2018-2028 (Statista, Smart factories , 2019).....	77

Figura 32: Impatto dell'IA sulle prestazioni dei lavoratori nel 2023, per livello di competenza (Statista, Digital transformation, 2024)	78
Figura 33: Mercato dell'IA nel mondo dal 2020 al 2030, in miliardi di dollari (Statista, 2024)	79
Figura 34: Proiezione dei ricavi globali dell'IA in miliardi di dollari (Hoffmann & Mehta, 2024).....	79
Figura 35: Mercato dei sensori a livello globale (Statista, Smart factories , 2019).....	80
Figura 36: Dispositivi IoT connessi a livello globale in miliardi di unità (Hoffmann & Mehta, 2024) *(1) CAGR: Tasso medio di crescita nel tempo.....	81
Figura 37: Ricavi annuali totali dell'IoT a livello mondiale in miliardi di dollari (Statista, Internet of Things (IoT), 2024).....	82
Figura 38: Investimenti AR e VR a livello mondiale in miliardi di dollari (Hoffmann & Mehta, 2024).....	83
Figura 39: Mercato AR e VR a livello globale dal 2021 al 2028, in miliardi di dollari (Hoffmann & Mehta, 2024).....	84
Figura 40: Lo sviluppo del concetto di qualità attraverso cinque generazioni di qualità (Deleryd & Fundin, 2020)	86

Indice delle tabelle

Tabella 1: Definizioni di CPS (Skilton & Hovsepian, 2018)	16
Tabella 2: le Tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 (Calenda, 2016)	21
Tabella 3: i modelli di impiego del Cloud Computing (Mell & Timothy, 2011).....	31
Tabella 4: confronto tra Qualità 4.0 e Qualità 5.0	95

1. Introduzione

Negli ultimi decenni, il panorama industriale globale ha subito trasformazioni radicali grazie all'avvento di nuove tecnologie. Due paradigmi emergenti, l'Industria 4.0 e l'Industria 5.0, rappresentano tappe fondamentali di questa evoluzione, portando con sé innovazioni che stanno ridefinendo i processi produttivi e il concetto stesso di Qualità. La Quarta Rivoluzione Industriale, nota come Industria 4.0, si concentra sull'automazione avanzata e l'interconnessione dei sistemi tramite tecnologie come l'Internet of Things, l'Intelligenza Artificiale e i Sistemi Cyber-fisici. Questo paradigma mira a creare fabbriche intelligenti dove macchine e processi sono altamente integrati e digitalizzati. Con l'Industria 5.0, si passa ad un livello successivo, ponendo l'accento sull'integrazione armoniosa tra uomo e macchina. Questo nuovo approccio non solo continua a sfruttare le tecnologie avanzate introdotte dalla precedente rivoluzione, ma le combina con principi di sostenibilità, resilienza e human-centricity. Il seguente lavoro di tesi propone di confrontare questi due paradigmi industriali dal punto di vista della Qualità. Verranno esplorati i requisiti, le differenze e le criticità inerenti a ciascun modello, con l'obiettivo di comprendere come l'evoluzione tecnologica influisca sulla qualità dei processi e dei prodotti. La Qualità, infatti, non è solo una questione di efficienza produttiva, ma anche di soddisfazione del cliente, sostenibilità e benessere dei lavoratori. Attraverso un'analisi dettagliata dei pilastri tecnologici e dei principi fondanti dei due paradigmi industriali, Industria 4.0 e Industria 5.0, il lavoro intende offrire una visione approfondita delle sfide e delle opportunità che caratterizzano la transizione verso un nuovo modello industriale. In particolare, verrà posto l'accento su come la centralità dell'uomo e la sostenibilità possano coesistere con l'automazione e la digitalizzazione avanzata, delineando così un futuro in cui l'industria è non solo più efficiente, ma anche più sostenibile e resiliente.

Il lavoro di tesi è composto da cinque capitoli: all'interno del primo capitolo viene ripercorsa la storia delle Rivoluzioni Industriali e delle innovazioni che hanno permesso l'avvento dei più recenti paradigmi industriali. Nel secondo capitolo viene riportata una panoramica della Quarta Rivoluzione Industriale, in particolare come quest'ultima sia stata definita da vari ricercatori e una panoramica dettagliata delle tecnologie definite "abilitanti" per l'Industria 4.0. Il terzo fornisce la descrizione della più recente Rivoluzione Industriale, l'Industria 5.0, e dei principi sui quali essa poggia: sostenibilità, resilienza e human-centricity. All'interno del quarto capitolo si cercherà di delineare la diffusione dei due paradigmi industriali e delle

1. Introduzione

principali tecnologie, che hanno permesso alle industrie di trasformarsi, passando dalle più tradizionali linee di produzione a vere e proprie Smart Factories. Infine, nel quinto capitolo, viene analizzata l'evoluzione del concetto di Qualità e come i due paradigmi industriali considerati abbiano influenzato quest'ultimo.

2. Le Rivoluzioni Industriali: Storia e Sviluppi tecnologici

Le Rivoluzioni Industriali rappresentano periodi di estrema trasformazione tecnologica e sociale che hanno radicalmente cambiato il modo in cui l'essere umano vive, lavora e interagisce con l'ambiente e con le macchine. All'interno di questo capitolo si è cercato di fornire una panoramica dettagliata di ciascuna Rivoluzione Industriale e di come queste hanno portato all'emergere dell'Industria 4.0, prima, e dell'Industria 5.0, poi.

2.1. Prima Rivoluzione Industriale

La Prima Rivoluzione Industriale ebbe origine nel Regno Unito nel tardo XVIII secolo e si diffuse rapidamente in altre parti del mondo. Caratterizzata dall'introduzione delle macchine a vapore che sostituirono il lavoro manuale nelle operazioni produttive, questa rivoluzione segnò il passaggio dalla produzione agricola e artigianale a quella meccanizzata (Skilton & Hovsepian, 2018) (Mohajan, *The First Industrial Revolution: Creation of a New Global Human Era*, 2019).

La Prima Rivoluzione Industriale ha avuto un impatto significativo su diverse industrie, tra cui quella del vetro, delle miniere di carbone, della navigazione a vapore, dell'agricoltura e dell'industria tessile. Il crescente numero di imprenditori in cerca di finanziamenti ha anche contribuito ad aumentare l'importanza delle istituzioni bancarie. Inoltre, nel settore dei trasporti, l'avvento delle locomotive a vapore ha reso possibile il trasporto di merci in tempi più brevi e a costi inferiori. Secondo Praveen Maddikunta (Maddikunta, et al., 2022), ciò ha determinato *"un notevole incremento nell'economia grazie all'aumento della capacità produttiva"*.

Il motore a vapore, una delle principali innovazioni tecnologiche introdotte in questo periodo nonché simbolo della rivoluzione industriale, fu inventato da Thomas Newcomen nel 1712 e successivamente perfezionato da James Watt nel 1776; Watt migliorò l'efficienza del motore a vapore introducendo il condensatore separato, riducendo significativamente il consumo di carbone e rendendo il motore praticabile per un'ampia gamma di applicazioni industriali (Figura 1). Grazie al suo utilizzo permise l'aumento della produzione di beni e il miglioramento dei trasporti (come dimostrato dalla ferrovia), gettando le basi per

2. Le Rivoluzioni Industriali: Storia e Sviluppi tecnologici

l'urbanizzazione e modificando permanentemente le strutture socio-economiche (Popkova, Ragulina, & Bogoviz, 2019) (Skilton & Hovsepiian, 2018).

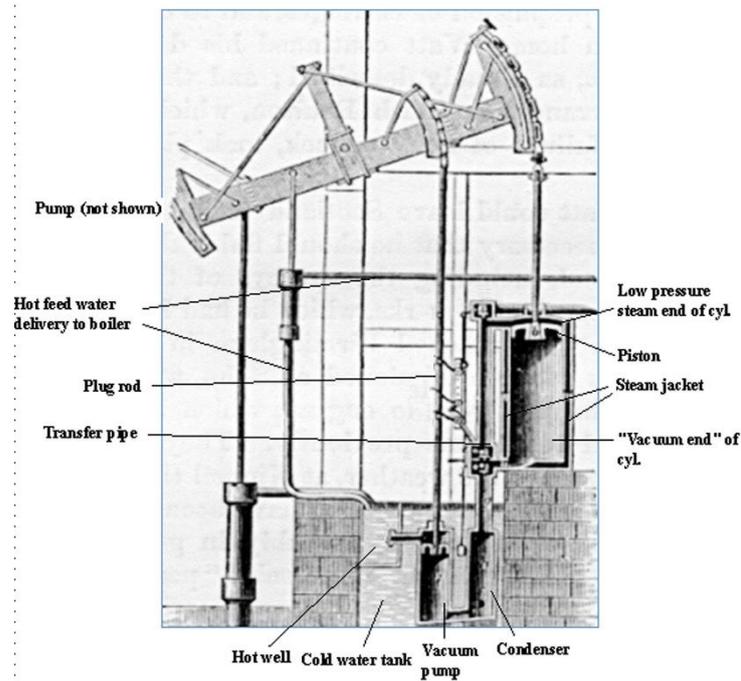


Figura 1: Macchina a vapore di James Watt (Wikipedia, Macchina a vapore di James Watt, 2024)

Innovazioni come la "Spinning Jenny" di James Hargreaves, la "Water Frame" di Richard Arkwright, e il "Mule Jenny" di Samuel Crompton (Figura 2) rivoluzionarono l'industria tessile. Queste macchine permettevano la produzione di filati e tessuti a velocità e volumi precedentemente inimmaginabili, alimentando la domanda di cotone grezzo e stimolando il commercio internazionale (Dima, 2024) (Mohajan, *The First Industrial Revolution: Creation of a New Global Human Era*, 2019).

2. Le Rivoluzioni Industriali: Storia e Sviluppi tecnologici



Figura 2: Industria tessile (S.U., 2024)

Le innovazioni nel processo di produzione del ferro e dell'acciaio, come il processo di puddellaggio introdotto da Henry Cort, permisero di ottenere una produzione di queste materie prime più economica e in quantità maggiori. Il materiale ottenuto, di migliore qualità, trovava impiego nella costruzione di macchinari, infrastrutture ferroviarie e strutture edilizie (Skilton & Hovsepian, 2018).

L'evoluzione dei sistemi di trasporto fu un altro pilastro della Prima Rivoluzione Industriale. Le ferrovie, alimentate da locomotive a vapore, ridussero drasticamente i costi e i tempi di trasporto di merci e passeggeri, catalizzando ulteriormente l'espansione industriale e urbana. Questo sviluppo fu complementare alla costruzione di canali navigabili e alla miglioria delle infrastrutture stradali, che integrarono ulteriormente i mercati regionali in un'economia nazionale coesa (Popkova, Ragulina, & Bogoviz, 2019).

Tuttavia, questo periodo di rivoluzione portò con sé, oltre alle varie innovazioni tecnologiche citate, tutta una serie di cambiamenti a livello economico, sociale e ambientale.

L'adozione di macchinari innovativi e la centralizzazione della produzione nelle fabbriche portarono a un incremento senza precedenti della produttività e dell'efficienza. Questo sviluppo ebbe un impatto trasformativo sull'economia, favorendo la crescita del PIL e l'accumulazione di ricchezza nelle mani degli imprenditori industriali, ma anche accentuando le disparità economiche e le condizioni lavorative precarie (Popkova, Ragulina, & Bogoviz, 2019).

2. Le Rivoluzioni Industriali: Storia e Sviluppi tecnologici

Un aspetto principalmente negativo di questo periodo è rappresentato infatti dalla pressione esercitata sulla classe operaia a causa della crescente domanda di manodopera. Inoltre, la mancanza di regolamentazione delle fabbriche ha comportato l'utilizzo di attrezzature e macchinari pericolosi, creando notevoli difficoltà per i lavoratori. In aggiunta, l'elevata richiesta di produzione ha portato ad orari di lavoro estremamente lunghi, spesso protratti fino a tarda notte, aumentando ulteriormente i rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori. Un altro aspetto negativo è stato l'impiego diffuso del lavoro minorile, che ha suscitato forti critiche. Le condizioni lavorative spesso insalubri e le lunghe giornate lavorative stimolarono movimenti operai e riforme sociali, culminando in legislazioni come il Factory Act del 1833, che introdusse limitazioni sulle ore di lavoro per i bambini e impose regole per proteggere i diritti e la sicurezza dei lavoratori (Skilton & Hovsepian, 2018) (Popkova, Ragulina, & Bogoviz, 2019).

Inoltre, la necessità di manodopera nelle fabbriche contribuì a un fenomeno di urbanizzazione senza precedenti. Le città industriali crebbero a ritmi vertiginosi, spesso superando la capacità delle infrastrutture urbane esistenti di supportare la nuova popolazione. Questo portò a condizioni di vita spesso precarie per i lavoratori. Questi cambiamenti demografici ebbero profonde implicazioni sociali, con la nascita di una nuova classe operaia e l'ascesa della borghesia industriale (Dima, 2024).

L'industrializzazione portò con sé anche un significativo degrado ambientale, caratterizzato da inquinamento atmosferico e idrico, deforestazione e alterazione dei paesaggi naturali. Le città industriali, in particolare, soffrirono di livelli elevati di inquinamento a causa della concentrazione di fabbriche e della combustione di carbone. Questi impatti sollevarono questioni cruciali riguardo la sostenibilità delle pratiche industriali, temi che continuano a essere rilevanti nell'attuale contesto di crisi climatica globale (Rinalducci, 2024).

Per concludere, la Prima Rivoluzione Industriale non fu solamente una trasformazione tecnologica ed economica, ma un fenomeno complesso che ristrutturò profondamente le società, influenzando le strutture politiche, sociali e l'ambiente. Inoltre, questo periodo di rivoluzione ha posto le basi per le successive trasformazioni industriali, modificando irreversibilmente il corso dello sviluppo umano. Studiare questo periodo non solo aiuta a comprendere le radici del moderno sistema industriale ma offre anche spunti critici per riflettere sulle sfide contemporanee dell'industrializzazione sostenibile.

2.2. Seconda Rivoluzione Industriale

La Seconda Rivoluzione Industriale, estendendosi approssimativamente dal 1870 al 1914, segna un periodo di profonda trasformazione tecnologica, economica e sociale. Diversamente dalla prima rivoluzione industriale che era centrata sull'introduzione delle macchine a vapore e sulla meccanizzazione della produzione tessile, la seconda rivoluzione industriale, spesso chiamata l'Età dell'Elettricità, è caratterizzata dall'espansione dell'industria pesante, dall'uso estensivo dell'energia elettrica, la quale trasformò le fabbriche in moderne linee di produzione incentrate principalmente sulla produzione di massa, e dalla nascita di nuove industrie come quelle chimica e automobilistica. Innovazioni come il nastro trasportatore di Henry Ford rivoluzionarono la produzione, rendendo possibile l'assemblaggio di prodotti complessi, come l'automobile, in modo più efficiente e a costi minori. Questo periodo vide anche importanti progressi nella comunicazione, come il telefono e il telegrafo. Questa rivoluzione non solo ha espanso le capacità produttive e geografiche del capitalismo industriale, ma ha anche modellato profondamente le strutture sociali e ambientali dei paesi coinvolti (Popkova, Ragulina, & Bogoviz, 2019) (Skilton & Hovsepian, 2018).

La Seconda Rivoluzione Industriale iniziò nel contesto del consolidamento delle economie capitaliste avanzate, soprattutto in Gran Bretagna, negli Stati Uniti e in Germania. L'epoca era segnata da un'intensa concorrenza economica internazionale e da un'espansione imperialista che cercava nuovi mercati per i prodotti industriali e nuove fonti di materie prime (Mohajan, *The Second Industrial Revolution has Brought Modern Social and Economic Developments*, 2020).

La diffusione dell'elettricità fu il tratto distintivo di questa rivoluzione. L'introduzione del generatore elettrico e del motore elettrico trasformò le industrie, permettendo una maggiore flessibilità ed efficienza. La dinamo, inventata da Antonio Pacinotti nel 1860 e perfezionata da Zenobe Gramme nel 1870, insieme all'invenzione del motore elettrico da parte di Nikola Tesla nel 1887 permisero la generazione di corrente continua, e successivamente alternata, che rivoluzionò l'industria, il trasporto e le comunicazioni. Le fabbriche poterono operare 24 ore su 24 con illuminazione adeguata e macchinari elettrici che sostituirono quelli a vapore, meno efficienti (Xu, Lu, Vogel-Heuser, & Wang, 2021) (Dima, 2024).

Henry Ford fu pioniere della catena di montaggio moderna, con l'introduzione della linea di montaggio mobile nel 1913 (Figura 3). Questo sistema incrementò notevolmente la velocità

2. Le Rivoluzioni Industriali: Storia e Sviluppi tecnologici

di produzione, riducendo il costo degli oggetti manifatturati, come l'automobile Modello T, rendendoli accessibili a un pubblico più ampio. La produzione di massa fu un cambiamento radicale che standardizzò i prodotti e minimizzò i tempi di inattività nella produzione (Dima, 2024).



Figura 3: Linea di montaggio mobile di Henry Ford (alevanni, 2024)

La Seconda Rivoluzione Industriale vide anche significativi progressi nel settore chimico e siderurgico. La produzione di acciaio, catalizzata dal processo Bessemer inventato nel 1856 e successivamente del processo Siemens-Martin, fu fondamentale per la costruzione di infrastrutture come ferrovie e grattacieli. Parallelamente, l'industria chimica fece grandi avanzamenti con la produzione sintetica di coloranti e la fertilizzazione artificiale, che aumentò notevolmente la produttività agricola e dell'industria tessile, spostando il baricentro della chimica da un'arte a una scienza industriale applicata (Popkova, Ragulina, & Bogoviz, 2019) (Mohajan, The Second Industrial Revolution has Brought Modern Social and Economic Developments, 2020).

Il clima di innovazione aprì la strada a imprenditori che sfruttavano le nuove tecnologie per costruire imperi industriali, come John D. Rockefeller nel petrolio e Andrew Carnegie nell'acciaio, che dominarono le loro rispettive industrie attraverso pratiche di business

2. Le Rivoluzioni Industriali: Storia e Sviluppi tecnologici

aggressive e talvolta monopolistiche. La massiccia espansione delle capacità produttive e l'innovazione tecnologica portarono a una crescita economica senza precedenti. Tuttavia, questo periodo vide anche l'accentuazione delle disuguaglianze economiche e la nascita di tensioni lavorative che sfociarono in numerose agitazioni e scioperi (Dima, 2024).

L'invenzione del telefono da parte di Antonio Meucci nel 1876 e la continua espansione delle linee telegrafiche migliorarono drasticamente la comunicazione globale, permettendo scambi di informazioni quasi istantanei su lunghe distanze, facilitando il commercio e la gestione delle operazioni aziendali (Skilton & Hovsepian, 2018).

Anche il settore dei trasporti ebbe una notevole crescita dal punto di vista tecnologico: l'espansione delle reti ferroviarie continuò a essere un motore di crescita economica, facilitando il trasporto rapido di merci e persone su lunghe distanze e stimolando lo sviluppo economico delle aree interne. Inoltre, in questo periodo vennero sviluppati i primi modelli di automobile, resa popolare da Ford, che, insieme all'invenzione e allo sviluppo dell'aviazione da parte dei fratelli Wright nel 1903 (Figura 4), trasformarono i modi di viaggiare (Popkova, Ragulina, & Bogoviz, 2019).

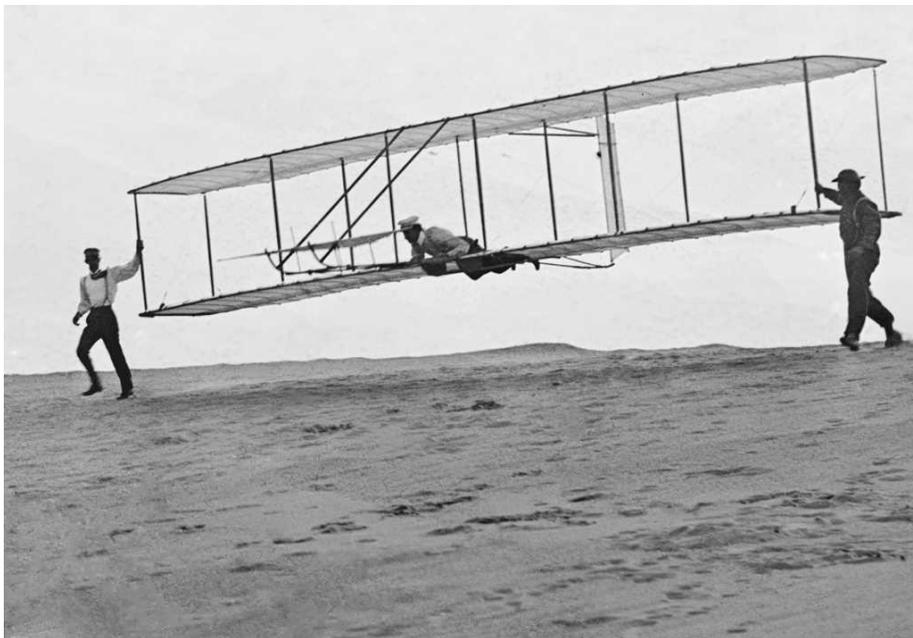


Figura 4: i fratelli Wright e l'invenzione dell'aeroplano (Metropolitan, 2024)

2. Le Rivoluzioni Industriali: Storia e Sviluppi tecnologici

Le numerose innovazioni sviluppate durante la Seconda Rivoluzione Industriale citate finora hanno avuto forte impatto anche dal punto di vista sociale e ambientale.

La crescita delle fabbriche e l'espansione urbana continuarono a spingere l'urbanizzazione, con un aumento significativo delle dimensioni delle città e del loro ruolo economico e sociale. Le città si espansero rapidamente, spesso senza adeguata pianificazione urbanistica, il che portò a condizioni di vita difficili per i nuovi arrivati rurali (Rinalducci, 2024).

Le fabbriche richiedevano manodopera specializzata per gestire i nuovi macchinari. Questo portò alla formazione di una nuova classe operaia e a una crescente organizzazione sindacale, che lottava per migliori condizioni di lavoro, salari più equi e orari di lavoro ridotti. Le condizioni spesso precarie imposte dalla produzione industrializzata di massa stimolarono una serie di riforme sociali e lavorative, inclusa l'introduzione di leggi volte a migliorare le condizioni lavorative, la sicurezza sul lavoro e a regolamentare l'impiego di manodopera minorile (Dima, 2024) (Skilton & Hovsepian, 2018).

L'industrializzazione massiccia deteriorò l'ambiente attraverso l'inquinamento atmosferico e idrico, la deforestazione e l'esaurimento delle risorse naturali. Le città industriali divennero simboli di inquinamento e degrado ambientale, con frequenti episodi di smog e contaminazione delle acque. La combustione di carbone e l'uso intensivo di risorse naturali causarono danni ecologici a lungo termine, molti dei quali sono ancora oggi oggetto di dibattito e di interventi di politica ambientale (Nahavandi, 2019).

La Seconda Rivoluzione Industriale non solo ha trasformato l'apparato produttivo, attraverso l'introduzione di tecnologie innovative e la reingegnerizzazione dei processi produttivi, ma ha anche ristrutturato profondamente il tessuto sociale attraverso cambiamenti demografici, l'urbanizzazione e la nascita di una società di consumo di massa. Queste trasformazioni hanno gettato le basi per le dinamiche economiche e sociali del XX secolo, segnando un'era definita da progresso tecnologico e da significative sfide socioeconomiche. Le innovazioni introdotte in questo periodo hanno portato benefici significativi ma anche nuovi problemi e sfide.

2.3. Terza Rivoluzione Industriale

La Terza Rivoluzione Industriale, conosciuta anche come Rivoluzione Digitale, rappresenta un'epoca segnata dall'ascesa dell'informatica e delle tecnologie dell'informazione che hanno iniziato a modellare profondamente l'economia globale a partire dagli anni '50 del XX

2. Le Rivoluzioni Industriali: Storia e Sviluppi tecnologici

secolo. Questa fase è caratterizzata dall'introduzione e dalla diffusione di computer, Internet, e altre tecnologie di comunicazione digitale che hanno reso possibile una più ampia automazione dei processi produttivi e hanno trasformato radicalmente sia il settore manifatturiero sia quello dei servizi (Dima, 2024).

La Terza Rivoluzione Industriale si è sviluppata in un contesto di crescente globalizzazione economica e di tensioni geopolitiche, come la Guerra Fredda. L'incremento dell'interdipendenza globale, combinato con l'accelerazione tecnologica, ha facilitato l'emergere di nuovi poteri economici e ha trasformato le dinamiche di mercato. Le crisi petrolifere degli anni '70 hanno inoltre stimolato la ricerca di nuove tecnologie energetiche (Mohajan, *Third Industrial Revolution Brings Global Development*, 2021).

Il cuore della Terza Rivoluzione Industriale è l'evoluzione del computer, che ha trovato le sue origini nei primi modelli degli anni '40 e '50 del Novecento, come l'ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer) (Figura 5). I computer, che una volta occupavano intere stanze ed erano accessibili solo a grandi corporazioni o governi, sono diventati progressivamente più piccoli e potenti (Popkova, Ragulina, & Bogoviz, 2019). Questo cambiamento è stato guidato dallo sviluppo dei circuiti integrati (microchip) e dei processori personali. Il primo microchip, sviluppato nel 1959 da Robert Noyce e Jack Kilby, ha permesso la miniaturizzazione e il miglioramento delle prestazioni dei computer. Tuttavia, è stato lo sviluppo del microprocessore nel 1971 a rendere i computer più accessibili al grande pubblico, ponendo le basi per l'informatica personale e per la successiva evoluzione dei dispositivi mobili e delle tecnologie cloud (Skilton & Hovsepian, 2018).

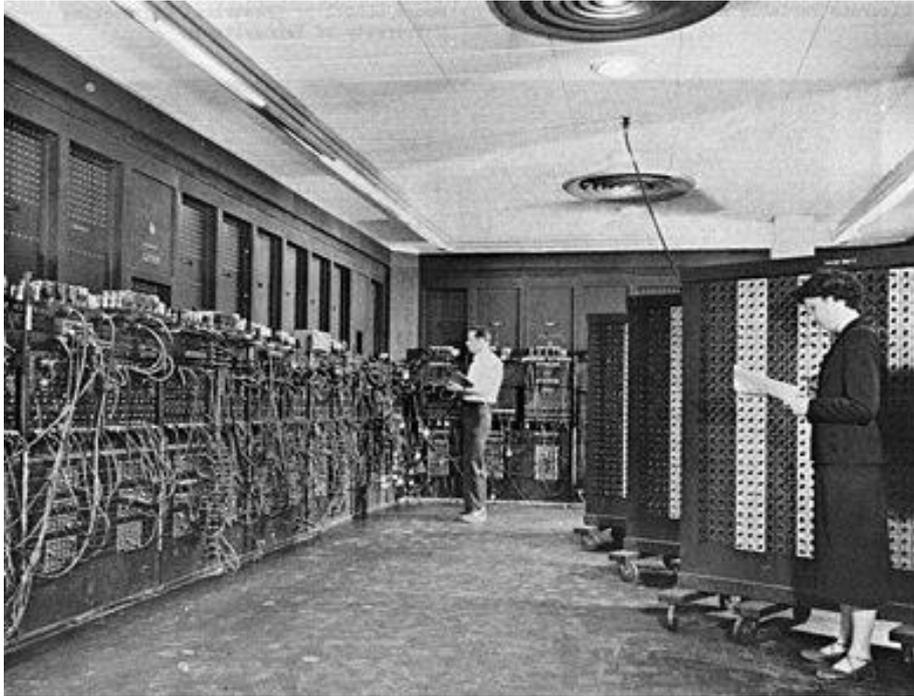


Figura 5: l'ENIAC al Ballistic Research Laboratory (Wikipedia, ENIAC, 2024)

Fondamentale è stato anche lo sviluppo di Internet, che ha preso forma negli anni '60 con progetti di ricerca militare e accademica, come l'ARPANET, evolvendosi poi nei decenni successivi fino a diventare la rete globale degli anni '90, con la creazione del World Wide Web da parte di Tim Berners-Lee. Parallelamente alla nascita e alla diffusione di Internet, l'evolversi delle tecnologie di telecomunicazioni, con lo sviluppo delle reti cellulari e della fibra ottica, ha permesso una connessione globale istantanea e il trasferimento di grandi quantità di dati, fondamentali per l'economia della conoscenza (Popkova, Ragulina, & Bogoviz, 2019).

La rete ha rivoluzionato le modalità di comunicazione, commercio e distribuzione dell'informazione, eliminando le barriere geografiche e riducendo drasticamente i costi di interazione. Queste tecnologie hanno accelerato il fenomeno della Globalizzazione, permettendo alle aziende di operare su scala globale con una facilità mai vista prima, influenzando profondamente le dinamiche di lavoro, produzione e consumo (Xu, Lu, Vogel-Heuser, & Wang, 2021).

Nel settore manifatturiero, grazie all'introduzione dei robot all'interno delle linee di produzione, le imprese sono state in grado di trasformare i processi produttivi, in particolare in settori come l'automobilistico e l'elettronica.

2. Le Rivoluzioni Industriali: Storia e Sviluppi tecnologici

La robotica ha permesso di incrementare notevolmente la produttività e la precisione nelle linee di produzione, migliorando la qualità del prodotto finale, e riducendo al contempo i costi di manodopera e i tempi di inattività delle macchine. Anche il settore del software ha visto un'espansione senza precedenti, con sistemi operativi, applicazioni di gestione aziendale e piattaforme di comunicazione che sono diventati fondamentali per il funzionamento delle economie moderne. Parallelamente, l'emergere dei Big Data e dell'analitica avanzata ha offerto nuove opportunità per l'ottimizzazione dei processi e per la personalizzazione delle offerte commerciali (Dima, 2024) (Rinalducci, 2024).

In Figura 6 è possibile osservare uno dei primi modelli di robot industriale, ovvero il robot UNIMATE che venne brevettato e poi realizzato dall'azienda Unimation, fondata da George Devol e da Joseph F. Engelberger (Wikipedia, Robot Industriale , 2024). Il robot UNIMATE fu costruito per la General Motors nel 1961 e venne installato in uno degli stabilimenti presenti in New Jersey (Wikipedia, Unimate, 2024). Il robot serviva per la manipolazione di pezzi fabbricati con la pressofusione presi da una linea e saldati sulle carrozzerie delle automobili. Operazione che poteva essere particolarmente rischiosa per un operaio, causa i fumi tossici e per l'eventuale danno fisico.

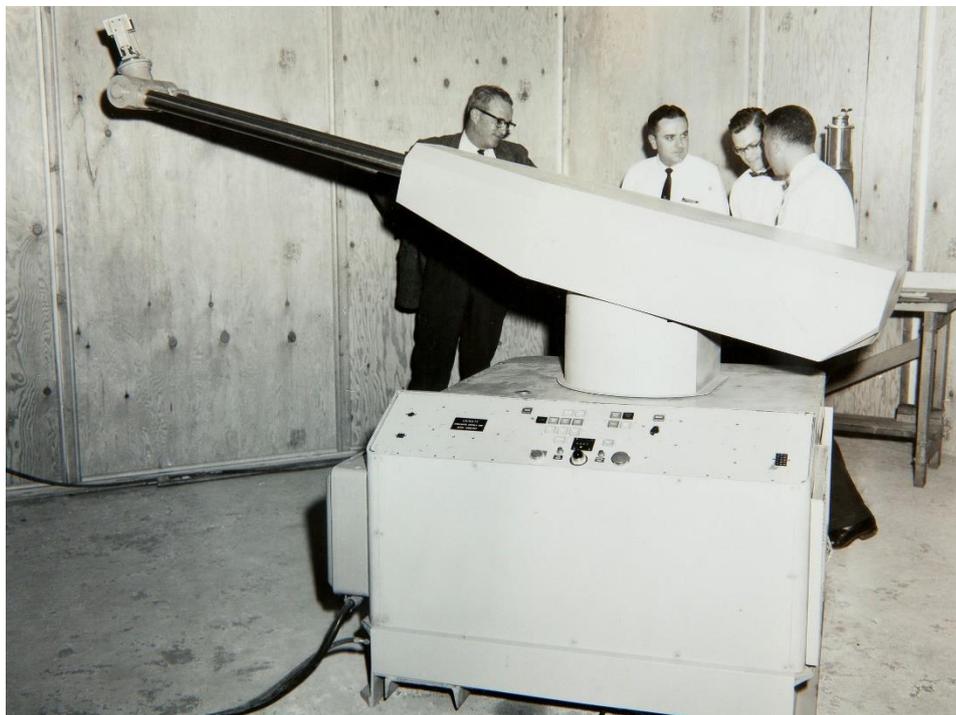


Figura 6: Robot UNIMATE (ROBOTS, 2024)

2. Le Rivoluzioni Industriali: Storia e Sviluppi tecnologici

L'automazione e la digitalizzazione all'interno dei processi produttivi hanno portato a significative trasformazioni nel mercato del lavoro, con la crescente richiesta di competenze informatiche e tecnologiche e la diminuzione della domanda per lavori manuali non qualificati. Tutto questo ha stimolato dibattiti su educazione e formazione, disuguaglianze di reddito e il futuro del lavoro.

Inoltre, la Terza Rivoluzione Industriale ha sollevato questioni ambientali significative: se da un lato l'espansione tecnologica ha portato ad un uso più efficiente delle risorse, dall'altro si è potuto notare un incremento dell'impronta ecologica dovuto al consumo energetico dei data center, all'inquinamento elettronico e alla produzione di rifiuti tecnologici, diventando argomenti di crescente preoccupazione globale. (Rinalducci, 2024)

La Terza Rivoluzione Industriale ha trasformato irrevocabilmente il tessuto economico, sociale e ambientale del mondo moderno, semplificando e ottimizzando processi precedentemente complessi e ridefinendo come imprese e individui interagiscono e partecipano all'economia globale. Sebbene abbia portato a miglioramenti significativi in termini di efficienza e connettività, ha anche introdotto nuove sfide, inclusa una maggiore disuguaglianza economica, problemi legati alla sicurezza dei dati e alla privacy e problemi ambientali complessi (Nahavandi, 2019) (Xu, Lu, Vogel-Heuser, & Wang, 2021). Questa rivoluzione ha definitivamente posto le basi per l'avvento della Quarta Rivoluzione Industriale, caratterizzata dall'ulteriore fusione tra le capacità umane e le macchine avanzate, concetti che verranno affrontati nei prossimi capitoli.

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

La Quarta Rivoluzione Industriale, spesso denominata Industria 4.0, rappresenta una nuova era caratterizzata dall'integrazione di tecnologie digitali, fisiche e biologiche. Questa rivoluzione si distingue per l'adozione di Sistemi Cyber-fisici, l'Intelligenza Artificiale, l'Internet of Things (IoT), la robotica avanzata, la stampa 3D, la biotecnologia, e altre tecnologie emergenti. Iniziata nel XXI secolo, questa fase estende le trasformazioni portate dalla Rivoluzione Digitale, promettendo di rimodellare l'economia globale e di rifondare i paradigmi produttivi e sociali.

3.1. Definizione e caratteristiche

Il termine Industria 4.0 è stato utilizzato per la prima volta in Germania nel 2011 quando, durante la fiera di Hannover, Siegfried Dais e Henning Kagermann presentarono il progetto *Zukunftsprojekt Industrie 4.0*, il cui obiettivo era quello di rinnovare completamente il sistema produttivo tedesco e portare così la Germania tra le prime manifatture a livello mondiale. Il termine rimanda quindi al concetto di quarta rivoluzione industriale e rappresenta un'evoluzione della terza rivoluzione industriale in quanto, invece di focalizzarsi sulla sola automazione delle macchine e dei processi, cerca di digitalizzare tutto ciò che circonda l'uomo, dai macchinari utilizzati nelle fabbriche fino agli oggetti di uso più comune, combinando assieme mondo fisico e mondo virtuale e modellando un ecosistema totalmente digitale (Skilton & Hovsepian, 2018).

La Quarta Rivoluzione Industriale detta un nuovo paradigma volto principalmente alla digitalizzazione e all'automazione dei processi industriali. La diffusione di Internet ha permesso infatti la creazione di Sistemi Cyber-Fisici (Cyber-Physical System, CPS) che sempre più vengono integrati nei processi di produzione e non solo. Con Sistemi cyber-fisici ci riferiamo a macchinari intelligenti e connessi ad internet che sono capaci di sostituire l'attività umana sfruttando una moltitudine di tecnologie che in seguito analizzeremo singolarmente.

Il termine Cyber-physical system viene proposto per la prima volta da Helen Gill nel 2006 durante il workshop sui Sistemi cyber-fisici organizzato dalla National Science Foundation (NSF) degli Stati Uniti (Rasim, Yadigar, & Sukhostat, 2018). Lo scopo principale di un sistema CPS è il controllo di un processo fisico e, attraverso l'analisi e la raccolta continuativa di dati, il suo adattamento in tempo reale.

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

Definition: Cyber-Physical System (CPS)
Is a system that integrate cyber components (namely, sensing, computation, and human users), connecting them to the Internet and to each other. It is the tight conjoining of and coordination between computational and physical resources called a digital twin (the physical assets, components, energy, materials, interfaces) and the cyber representation of the physical system (the software, digital data, usage, sensors that enables higher capability, adaptability, scalability, resiliency, safety, security, and usability (Houbing, Danda B., Sabina, & Christian, 2016).
<i>“Such systems use computations and communication deeply embedded and interacting with physical processes to add new capabilities to the physical system. These CPS range from miniscule (Heart pacemakers) to large-scale (the national powergrid).” (Summit, 2008)</i>

Tabella 1: Definizioni di CPS (Skilton & Hovsepian, 2018)

I CPS (Tabella 1) quindi si fondano su macchine e oggetti correlati che, attraverso sensori, attuatori e connessioni in rete, generano e acquisiscono dati di varia natura, riducendo così le distanze e le asimmetrie informative tra tutti gli elementi del sistema. Con l'aiuto di sensori diffusi, il CPS può determinare autonomamente il suo stato operativo corrente, all'interno dell'ambiente in cui si trova e qualunque sia la distanza tra gli oggetti che lo compongono. Gli attuatori svolgono le azioni pianificate ed eseguono decisioni correttive, ottimizzando un processo o risolvendo un problema. Le decisioni sono assunte da un'intelligenza che valuta le informazioni interne al CPS e, in alcuni scenari, anche le informazioni provenienti da altri CPS (Cyber-physical systems of systems, CPSoS) (Internet4Things, 2024).

Questa prima definizione di CPS potrebbe far pensare che all'interno dell'Industria 4.0 l'uomo viene completamente sostituito dalla macchina, ma non è così: all'interno della Smart Factory, l'essere umano assume il controllo di istanza di più alto livello, supervisionando le operazioni di processi per lo più automatizzati.

All'interno della Quarta Rivoluzione Industriale, infatti, si fa riferimento al termine “Smart Factory”, che facendo leva sulle tecnologie sfruttate dai Sistemi cyber fisici offre un nuovo modello per la progettazione degli impianti che introduce l'intelligenza digitale a presidio dei workflow industriali e come chiave per la ricerca e l'innovazione di prodotto (Eurodrive, 2024).

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

Nel 2015, Elvis Hozdić (Hozdić, 2015) fornisce questa definizione: *“La Smart Factory è una soluzione di produzione che offre processi di produzione così flessibili e adattivi da risolvere problemi emergenti in un impianto di produzione con condizioni al contorno dinamiche e in rapido cambiamento in un mondo di crescente complessità. Questa soluzione speciale potrebbe da un lato essere correlata all'automazione, intesa come una combinazione di software, hardware e/o meccanica, che dovrebbe portare all'ottimizzazione della produzione risultando nella riduzione del lavoro non necessario e dello spreco di risorse. Dall'altro lato, potrebbe essere vista in una prospettiva di collaborazione tra diversi partner industriali e non industriali, dove l'intelligenza deriva dalla formazione di un'organizzazione dinamica.”*

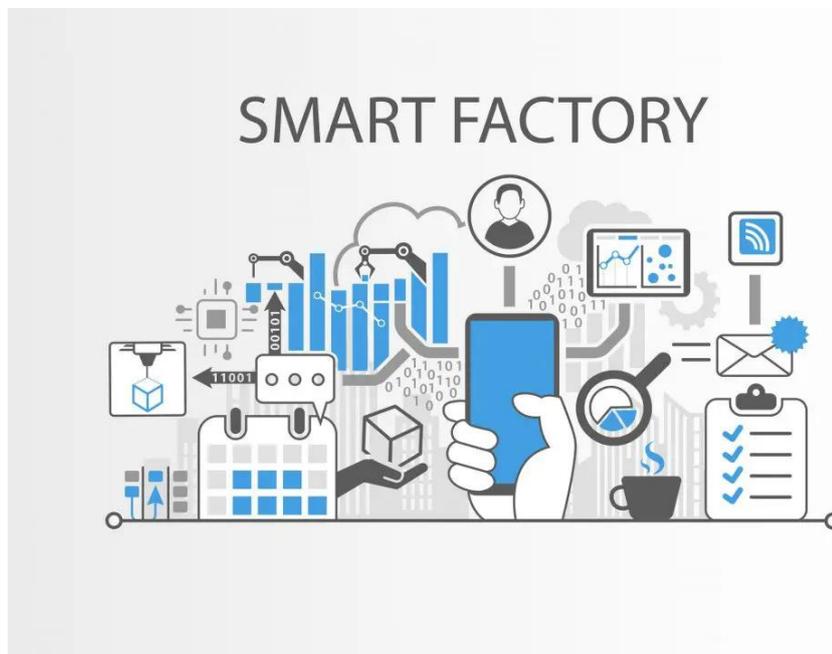


Figura 7: Smart Factory (Tecno4Industry, 2024)

Dunque, il concetto di Smart Factory non è legato esclusivamente all'utilizzo dell'automazione e della robotica all'interno dei sistemi produttivi, che avveniva già in passato all'interno delle fabbriche tradizionali, ma si basa sulla coesione che si crea tra macchine e dispositivi interconnessi tra loro, grazie alle tecnologie che verranno analizzate nei prossimi capitoli.

3.2. Tecnologie abilitanti: i nove “pilastri” dell’Industria 4.0

Dopo aver descritto le caratteristiche generali e i principi distintivi di questa Rivoluzione, occorre ora descrivere le principali innovazioni e le tecnologie che rappresentano i “pilastri” sulla quale si fonda la definizione stessa di Industria 4.0.

Come detto nei precedenti capitoli, ogni rivoluzione industriale è stata caratterizzata da una singola innovazione tecnologica: la Prima Rivoluzione Industriale fu fondamentale per l’introduzione di nuove fonti energetiche, in particolare con l’utilizzo del vapore e del carbone, in sostituzione della forza umana o animale all’interno dei sistemi produttivi; la Seconda Rivoluzione Industriale si distinse per l’avvento dell’energia elettrica, con la quale vennero ottimizzati i processi industriali; infine, la Terza Rivoluzione Industriale, con la nascita dei computer, ha permesso di migliorare i diversi aspetti del mondo digitale, quali l’archiviazione, la gestione e l’elaborazione di dati e informazioni.

A differenza delle precedenti, la Quarta Rivoluzione Industriale non si distingue per l’introduzione di una singola innovazione tecnologica, ma, attraverso la combinazione di diverse tecnologie, si focalizza sui legami che vengono a crearsi tra le macchine, le persone e i sistemi informativi. Uno studio condotto dalla società di consulenza Boston Consulting Group (Rubmann, et al., 2015) mette in risalto le caratteristiche innovative che l’introduzione delle tecnologie utilizzate dal paradigma dell’Industria 4.0 porterebbero all’interno dei sistemi industriali. L’interconnessione tra le risorse presenti all’interno del sistema produttivo permette di creare le Smart Factory, integrare il sistema di fabbrica con le filiere produttive, all’interno delle quali anche le catene di fornitura e i consumatori svolgono un ruolo fondamentale; inoltre, consente di modificare i tradizionali rapporti esistenti tra produttori, fornitori e clienti, nonché tra uomini e macchine (Figura 8).

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

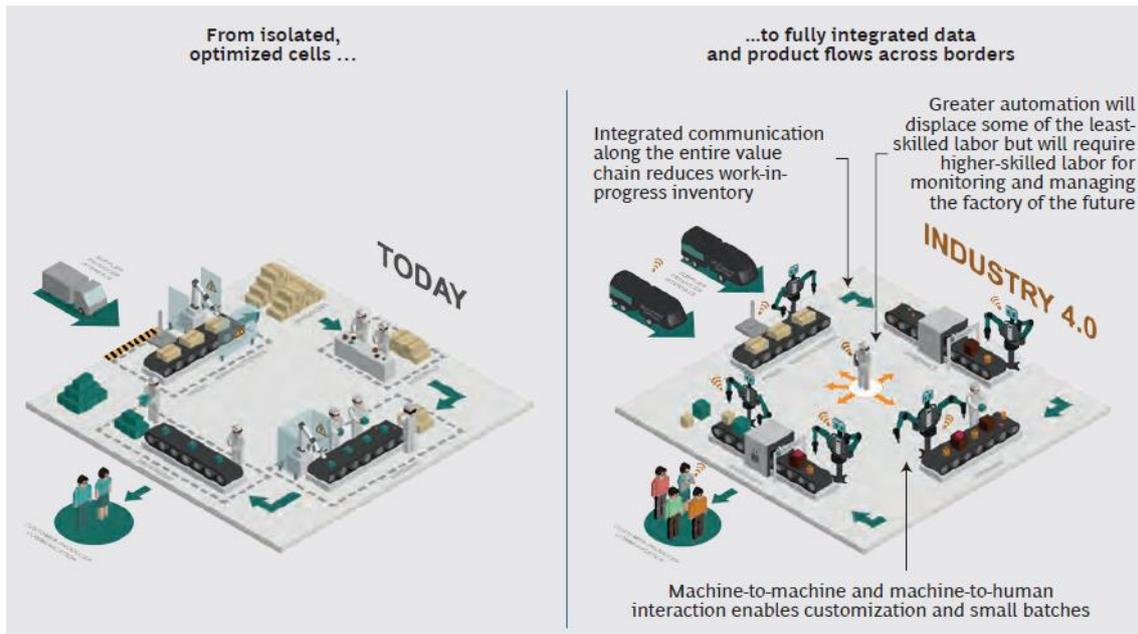


Figura 8: l'Industria 4.0 sta cambiando le tradizionali relazioni di produzione (Rubmann, et al., 2015)

All'interno della relazione pubblicata da Boston Consulting Group nel 2015 (Rubmann, et al., 2015) vengono anche definite tutta una serie di tecnologie abilitanti, il cui coinvolgimento e utilizzo appaiono fondamentali per realizzare l'interazione e la cooperazione tra gli oggetti, le persone e i sistemi presenti all'interno della Smart Factory. In Figura 9, è possibile osservare un elenco riportante le suddette tecnologie, che verranno descritte nel dettaglio in seguito, le quali sono funzionali per i sistemi cyber-fisici e supportano un nuovo modo di fare industria.

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)



Figura 9: le nove tecnologie che stanno trasformando la produzione industriale (Rubmann, et al., 2015)

Queste tecnologie vengono riprese all'interno del 'Piano Nazionale Industria 4.0' (Calenda, 2016), la strategia di politica industriale del Governo italiano per promuovere la digitalizzazione e il rafforzamento competitivo del tessuto produttivo del paese, pubblicato nel 2016. In Tabella 2, è riportata una breve descrizione delle tecnologie citate, riprese dal documento del Piano Nazionale Industria 4.0.

Autonomous Robots	Robot collaborativi interconnessi e rapidamente programmabili
Additive Manufacturing	Stampanti in 3D connesse a software di sviluppo digitali
Augmented Reality	Realtà aumentata a supporto dei processi produttivi
Simulation	Simulazione tra macchine interconnesse per ottimizzare i processi

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

Horizontal/Vertical System Integration	Integrazione informazioni lungo la catena del valore dal fornitore al consumatore
Industrial Internet of Things	Comunicazione multidirezionale tra processi produttivi e prodotti
Cloud	Gestione di elevate quantità di dati su sistemi aperti
Cyber-Security	Sicurezza durante le operazioni in rete e su sistemi aperti
Big Data and Analytics	Analisi di un'ampia base dati per ottimizzare prodotti e processi produttivi

Tabella 2: le Tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 (Calenda, 2016)

I successivi sottocapitoli saranno dedicati alla trattazione dettagliata di queste tecnologie abilitanti, individuate all'interno della letteratura come fondamenta su cui poggia il paradigma dell'Industria 4.0, per poter valutare i benefici e le opportunità che la loro implementazione ed applicazione comportano a livello aziendale, ma anche i limiti e i rischi legati, soprattutto a livello sociale, che ne ostacolano la diffusione.

3.2.1. Industrial Internet of Things

L'Industrial Internet of Things (IIoT), o più semplicemente Internet of Things, può essere vista come una delle più importanti tecnologie all'interno del paradigma dell'Industria 4.0, essendo maggiormente citata in letteratura, e viene spesso definita come indispensabile e fondamentale per la nascita e la diffusione della Quarta Rivoluzione Industriale.

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

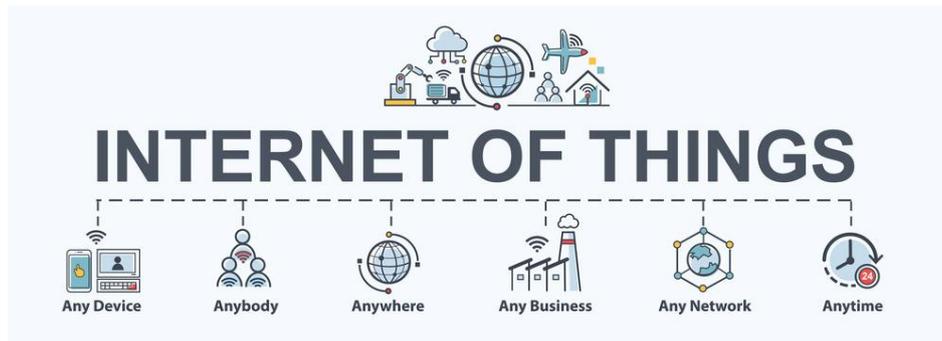


Figura 10: Internet of Things (IoT) (Todorovich, 2024)

L'IoT, descritto come una rete di macchine e dispositivi in grado di comunicare tra loro (Lee & Lee, 2015), rappresenta un sistema all'interno del quale gli oggetti fisici sono connessi ad internet e interagiscono grazie a componenti elettroniche incorporate. Fondamentali per lo sviluppo di sistemi basati sull'utilizzo dell'Internet of Things sono le tecnologie RFID e WSN. La tecnologia RFID (Nambiar, 2009) consiste in una combinazione di tags e readers: i tags memorizzano e tramettono dati ai readers attraverso l'utilizzo di onde radio; i readers raccolgono i dati inviati dai diversi tags e li trasmettono al server per essere analizzati ed elaborati. Questo scambio di dati permette al sistema di identificare e monitorare in maniera continuativa ed automatica le risorse presenti all'interno dell'ambiente industriale. Una WSN (Buratti, Conti, Dardari, & Verdone, 2009) può essere definita come una rete di dispositivi, chiamati 'nodi', che sono in grado di percepire l'ambiente nel quale vengono utilizzati e scambiare le informazioni raccolte all'interno di questo ambiente attraverso collegamenti wireless: i dati raccolti vengono poi inviati ad un nodo di raccolta, spesso chiamato 'controller' o 'monitor'. Queste due tecnologie permettono la creazione di un'infrastruttura digitale in grado di acquisire, distribuire ed elaborare i dati in maniera autonoma e continuativa.

L'utilizzo di questi dispositivi e lo svilupparsi di altre tecnologie emergenti consente la trasformazione delle tradizionali industrie manifatturiere in Smart Factories. Il fine ultimo della diffusione dell'Internet of Things è quello di rendere gli oggetti e le risorse presenti all'interno di un sistema produttivo comunicanti e interconnessi tra loro. In questo nuovo contesto industriale, anche gli oggetti fisici sono integrati all'interno della rete di dati e informazioni continuamente scambiati e rappresentano un valore aggiunto nei processi aziendali, poiché possono comunicare informazioni sul proprio stato, sui processi nel quale si trovano, sulla manutenzione e sul controllo di impianti e macchinari e sull'ambiente circostante (Shrouf, Ordieres, & Miragliotta, 2014).

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

Lo studio condotto da In Lee e Kyoochun Lee (Lee & Lee, 2015) individua tre ambiti di applicazione aziendale dell'IoT, riportando alcuni esempi significativi e i diversi benefici collegati:

- 1) **Monitoring and Control:** I sistemi di monitoraggio e controllo, che raccolgono dati relativi alle prestazioni delle attrezzature, al consumo energetico e alle condizioni ambientali, consentono ai manager di monitorare costantemente le prestazioni in tempo reale, da qualsiasi luogo e in qualsiasi momento. Le tecnologie avanzate di monitoraggio e controllo permettono di individuare modelli operativi, identificare aree per potenziali miglioramenti, prevedere risultati futuri e ottimizzare le operazioni. Questo porta a una riduzione dei costi e a un incremento della produttività. In particolare, la Smart House rappresenta un esempio significativo di innovazione nei sistemi di monitoraggio e controllo nell'ambito dell'Internet of Things. Le principali proposte di valore di tale tecnologia includono la protezione della famiglia e della proprietà, nonché il risparmio energetico. Un esempio è rappresentato dalla rete di monitoraggio e controllo della casa proposta da Verizon, che impiega una tecnologia di comunicazione wireless specificamente progettata per applicazioni di controllo remoto nell'automazione domestica. Attraverso questa rete, gli elettrodomestici e i dispositivi IoT possono essere monitorati e controllati da remoto tramite dispositivi come computer, tablet o smartphone, consentendo agli utenti di regolare l'illuminazione, gestire il clima, controllare il sistema di sicurezza (Verizon, 2010). L'IoT trova applicazione anche nel monitoraggio e controllo dei componenti automobilistici, dove le principali proposte di valore per il cliente si focalizzano sull'esperienza personalizzata e sulla soddisfazione del conducente. Un esempio di tale innovazione è il progetto di ricerca congiunto tra Ford e Intel del 2014, denominato Mobile Interior Imaging, che integra la tecnologia di riconoscimento facciale per migliorare i controlli sulla privacy e identificare automaticamente i diversi conducenti, adeguando di conseguenza le impostazioni del veicolo in base alle preferenze individuali (Lee & Lee, 2015) (Rusconi, 2014).
- 2) **Big Data and Business Analytics:** Dispositivi IoT e macchine dotate di sensori e attuatori integrati producono enormi quantità di dati che sono trasmessi a strumenti di business intelligence e di analisi per supportare il processo decisionale umano in riferimento al contesto in esame. Tali dati sono utilizzati dai

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

manager per poter identificare e risolvere problematiche aziendali, come variazioni nei comportamenti dei consumatori e nelle condizioni di mercato, al fine di migliorare la soddisfazione del cliente e offrire servizi a valore aggiunto. Un esempio è rappresentato dallo sviluppo da parte di Procter & Gamble dello spazzolino elettrico interattivo Oral-B Pro 5000, che mira a fornire agli utenti una routine di igiene orale più intelligente e personalizzata. Questo spazzolino elettrico interattivo, che registra le abitudini di spazzolamento e offre consigli per la cura della bocca tramite l'utilizzo di un'applicazione mobile, rappresenta un'innovazione significativa che concede agli utenti un controllo senza precedenti sulla loro igiene orale (Lee & Lee, 2015).

- 3) Information Sharing and Collaboration: La condivisione di informazioni e la collaborazione nel contesto dell'Internet of Things può avvenire tra persone, tra persone e oggetti, e tra oggetti stessi. Il rilevamento di un evento predefinito rappresenta spesso il primo passo verso una condivisione di informazioni efficace e una collaborazione ottimale. Nell'ambito delle catene di approvvigionamento (Supply chain), queste dinamiche sono fondamentali per prevenire ritardi e distorsioni informative. Per esempio, posizionando sensori in un negozio al dettaglio dove è necessaria la refrigerazione, si possono inviare notifiche automatiche al dispositivo mobile del manager non appena i frigoriferi presentano malfunzionamenti. Il manager può successivamente consultare i report sullo stato degli operatori per identificare chi è disponibile e assegnare compiti tramite il dispositivo mobile abilitato dell'operatore (Lee & Lee, 2015).

Oltre ai numerosi vantaggi individuati, esistono anche tutta una serie di difficoltà e limitazioni nell'utilizzo di questa tecnologia. Primo fra tutti, l'utilizzo dell'IoT implica notevoli costi di sviluppo e manutenzione poiché necessita di un'infrastruttura tecnologica di notevole portata; inoltre, bisogna considerare anche le sfide relative alla privacy e alla sicurezza dei dati.

3.2.2. Big Data and Analytics

Il concetto di "Big Data" è stato introdotto originariamente nell'ambito informatico da Roger Magoulas di O'Reilly Media nel 2005 (Halevi & Moed, 2012). Il termine è stato coniato per descrivere volumi di dati così estesi che le metodologie tradizionali di gestione dati risultavano inefficaci nella loro gestione, a causa della complessità e delle dimensioni di tali insiemi di dati. Nel contesto contemporaneo, il Big Data viene

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

esaminato da molteplici prospettive, abbracciando le sue implicazioni in diversi ambiti disciplinari. Secondo il framework MIKE 2.0 (Method for an Integrated Knowledge Environment), uno standard open source per la gestione delle informazioni, il Big Data si caratterizza per le sue dimensioni significative, comprendendo collezioni di dati vasti, complessi e indipendenti, ciascuno dei quali possiede la capacità di interagire tra loro. Una sfida notevole nel trattamento del Big Data è la sua gestione, che non può avvalersi di tecniche standard a causa dell'incoerenza e dell'imprevedibilità delle combinazioni di dati che possono emergere (Ularu, Puican, Apostu, & Velicanu, 2012). IBM identifica quattro dimensioni fondamentali del Big Data: Volume, Velocità, Varietà e Veridicità:

- Il termine Volume si riferisce alla quantità di dati raccolti e analizzati al fine di sviluppare i risultati cercati;
- Il termine Velocità si riferisce alla rapidità di elaborazione necessaria per rispondere tempestivamente a dinamiche di mercato cruciali;
- Il termine Varietà fa riferimento ai diversi tipi di dati trattati, vengono definite tre tipologie di dati: Dati Strutturati, Semi-Strutturati e Non Strutturati (BUCAP, 2024)
- Il termine Veridicità identifica il grado di affidabilità delle informazioni utilizzate per le decisioni strategiche.

Il Gartner's Information Technology Glossary (Glossary, 2024) definisce il Big Data come un complesso di asset informativi caratterizzati da alto volume, velocità e varietà, che richiedono modalità innovative ed economicamente vantaggiose per l'elaborazione, al fine di potenziare la comprensione e il processo decisionale. Ed Dumbill, presidente della Strata Conference di O'Reilly, descrive il Big Data (Dumbill, 2012) come dati che *"superano la capacità di elaborazione dei sistemi di database tradizionali, spingendosi oltre le capacità architetturali esistenti"*. Per valorizzare tali dati, è essenziale adottare metodologie alternative di elaborazione. Il Big Data può essere definito come un insieme di dati di vasta entità, alta complessità e struttura variabile, che sono organizzati, memorizzati ed elaborati mediante metodi specifici per migliorare i processi aziendali. La definizione di Big Data assume un ruolo critico nelle strategie aziendali, poiché ogni manager deve adattare il concetto per garantire un vantaggio competitivo alla propria organizzazione (Ularu, Puican, Apostu, & Velicanu, 2012).

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

L'importanza fondamentale del Big Data si manifesta nella sua capacità di incrementare l'efficienza attraverso l'impiego di vasti volumi di dati di varia natura. Un'adeguata definizione e utilizzo del Big Data consente alle organizzazioni di acquisire una comprensione più approfondita della propria attività operativa, favorendo così miglioramenti in molteplici settori, quali le vendite e il perfezionamento dei prodotti.

Il Big Data viene utilizzato efficacemente in diversi ambiti (Ularu, Puican, Apostu, & Velicanu, 2012):

- Nel settore della tecnologia dell'informazione: il Big Data è utilizzato per potenziare la sicurezza e facilitare la risoluzione dei problemi, attraverso l'analisi dei pattern presenti nei log esistenti;
- Nel servizio clienti: l'analisi dei dati raccolti dai centri di assistenza permette di identificare i modelli di comportamento dei clienti, migliorando di conseguenza la soddisfazione degli stessi mediante la personalizzazione dei servizi offerti;
- L'impiego dei contenuti dei social media contribuisce al miglioramento di servizi e prodotti, permettendo alle aziende di adeguare l'offerta alle preferenze dei potenziali consumatori e, di conseguenza, di estendere il proprio mercato;
- Nel contesto delle transazioni online: il Big Data è fondamentale per l'identificazione e la prevenzione di frodi in vari settori industriali.

Il Big Data, se correttamente interpretato e impiegato, può trasformare significativamente l'efficacia operativa delle aziende, guidando decisioni strategiche basate su una solida analisi dati.

Bisogna considerare anche l'esistenza di alcuni limiti riguardanti l'adozione di Big Data all'interno della propria strategia aziendale: con il continuo evolversi delle varie tecnologie, le aziende necessitano di strumentazione idonea per poter elaborare un'ingente quantità di dati in tempi relativamente brevi e soprattutto vi è necessità di personale con competenze specialistiche nel campo del Big Data. Secondo uno studio condotto dalla società di consulenza McKinsey intitolato "Big Data: The next frontier for innovation, competition, and productivity" (Manyika, et al., 2011), in futuro, solo negli Stati Uniti, saranno richiesti 190.000 nuovi lavoratori con competenze analitiche e più di 1,5 milioni di managers in grado di gestire questa tipologia di dati. Questo studio sottolinea l'importanza, per le aziende, di reclutare esperti o formare adeguatamente il

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

proprio personale per poter trarre vantaggio competitivo da questa nuova tecnologia. Infine, bisogna considerare anche i rischi legati alla privacy e alla sicurezza dei dati, poiché la gestione di vasti e complessi insiemi di dati implica difficoltà nell'ordinamento di questi ultimi per livelli di privacy e nella successiva applicazione delle misure di sicurezza adeguate (Ularu, Puican, Apostu, & Velicanu, 2012).

3.2.3. Cloud Computing

Il NIST (National Institute of Standards and Technology) ha pubblicato nel settembre del 2011 un documento utile alla definizione del Cloud Computing, riferendosi a questa tecnologia come *“un modello progettato per garantire l'accesso sempre presente, agevole e su richiesta ad un pool condiviso di risorse informatiche configurabili (reti, server, applicazioni e servizi), richiedendo il minimo sforzo gestionale e di interazione con il fornitore del servizio”* (Mell & Timothy, 2011).

Precedentemente alla definizione fornita dal NIST, IBM (Boss, Malladi, Quan, Linda, & Hall, 2007) lega il concetto di Cloud Computing sia al concetto di piattaforma sia al concetto di applicazione: il Cloud rappresenta una tecnologia che facilita la configurazione dinamica, la riconfigurazione, e la dismissione di server in base alle necessità operative. Tale piattaforma può gestire server sia fisici che virtuali, e si caratterizza per l'inclusione di risorse computazionali avanzate, come reti di area di memorizzazione (Storage Area Network, o SAN, sono reti ad altissima velocità di trasmissione costituite esclusivamente da dispositivi di memorizzazione di massa (Wikipedia, Storage Area Network, 2024)), equipaggiamenti di rete e dispositivi di sicurezza quali firewall. Il termine Cloud Computing descrive inoltre applicazioni che sono progettate per essere accessibili attraverso Internet. Queste applicazioni, ospitate in grandi data center, sfruttano la capacità di potenti server per fornire servizi e applicazioni web. L'accesso a tali applicazioni cloud è possibile per chiunque disponga di una connessione internet adeguata e di un browser standard.

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

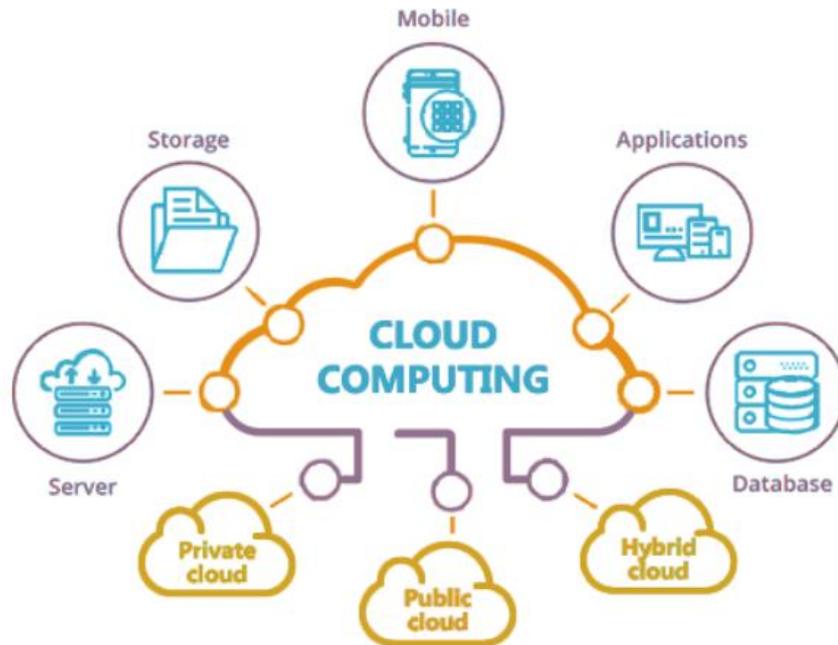


Figura 11: il Cloud Computing (LaNotiziaWeb, 2024)

All'interno della relazione pubblicata dal NIST (Mell & Timothy, 2011) vengono poi definite cinque caratteristiche essenziali, tre modelli di servizio e quattro modelli di impiego che compongono il modello tecnologico del Cloud Computing. Le caratteristiche essenziali individuate sono:

- 1) On-demand self-service → un utente può, in maniera autonoma e a seconda delle sue necessità, attingere alle capacità di calcolo e di elaborazione, come ad esempio lo spazio di archiviazione di rete, senza richiedere interazioni umane con ciascun fornitore di servizi;
- 2) Broad network access → le risorse sono disponibili attraverso la rete e accessibili tramite meccanismi standard che favoriscono l'uso di piattaforme client eterogenee (ad esempio, telefoni cellulari, tablet, laptop e workstation);
- 3) Resource pooling → le risorse di calcolo sono in grado di servire più consumatori contemporaneamente utilizzando un modello multi-tenant, con risorse fisiche e virtuali assegnate e ri-assegnate dinamicamente in base alla domanda del consumatore. Alcuni esempi di risorse possono essere l'archiviazione, l'elaborazione, la memoria e la larghezza di banda di rete;

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

- 4) Rapid elasticity → le risorse utilizzabili dagli utenti sembrano essere illimitate e disponibili in qualsiasi momento, grazie all'elasticità con le quali vengono programmate e fornite;
- 5) Measured service → i sistemi cloud controllano e ottimizzano automaticamente l'uso delle risorse sfruttando la capacità di misurazione appropriata al tipo di servizio. L'uso delle risorse può essere monitorato, controllato e riportato, fornendo trasparenza sia per il fornitore che per il consumatore del servizio utilizzato.

L'architettura del modello del Cloud Computing può essere strutturata secondo tre diversi modelli di servizio (Wang, Gao, & Fan, 2015), in Figura 12 è possibile osservare il livello di controllo che l'utente ha sull'infrastruttura cloud a seconda del livello di servizio: IaaS (Infrastructure as a Service) rappresenta un modello nel quale le risorse vengono supportate dall'infrastruttura del provider e, grazie ad una tecnica di virtualizzazione, fornite all'utente; l'utente non gestisce l'infrastruttura cloud sottostante ma ha il dominio esclusivo e completo sui sistemi operativi distribuiti. Il secondo modello, PaaS (Platform as a Service), fornisce le risorse a livello di piattaforma per permettere agli utenti di sviluppare applicazioni e gestire direttamente le impostazioni di configurazione, un esempio di questa tipologia di servizio è Google App Engine una risorsa offerta da Google che offre un'interfaccia di programmazione per applicazioni web (Wikipedia, Google App Engine, 2024). Infine, il modello SaaS (Software as a Service) consente agli utenti di utilizzare l'infrastruttura cloud, fornita dal provider, come un servizio per eseguire le applicazioni su dispositivi client, come ad esempio un browser web (Mell & Timothy, 2011).

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

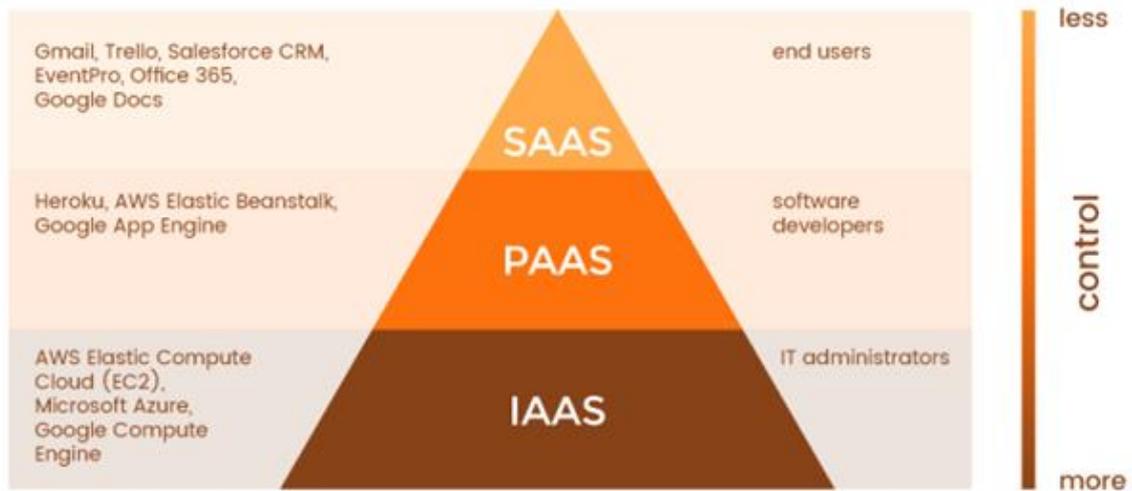


Figura 12: i modelli di servizio del Cloud (PrimeIT, 2024)

Inoltre, all'interno della relazione pubblicata dal NIST dove è stata fornita una descrizione completa e dettagliata del Cloud Computing (Mell & Timothy, 2011), vengono poi definiti quattro modelli di impiego, riportati in Tabella 3.

Private Cloud	L'infrastruttura cloud è ad uso esclusivo di una singola organizzazione che può comprendere più utenti (ad esempio unità aziendali). Può essere di proprietà, gestita e operata dall'organizzazione, da un terzo o da una combinazione di entrambi, e può essere gestita sia all'interno che all'esterno dell'organizzazione che ne è proprietaria.
Community Cloud	L'infrastruttura è utilizzata da una specifica community di utenti provenienti da organizzazioni che hanno interessi condivisi (come, ad esempio, requisiti di sicurezza). Può essere di proprietà e gestita da una o più delle organizzazioni all'interno della community, oppure da un terzo esterno.
Public Cloud	L'infrastruttura cloud permette il libero accesso ad un pubblico generico, come un'istituzione accademica.

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

Hybrid Cloud	L'infrastruttura, in questo caso, è una composizione di due o più infrastrutture cloud distinte (private, community o public) che rimangono entità uniche, ma sono legate insieme da tecnologie standardizzate che consentono la portabilità dei dati e delle applicazioni.
--------------	---

Tabella 3: i modelli di impiego del Cloud Computing (Mell & Timothy, 2011)

I vantaggi identificati dall'utilizzo di questa tecnologia sono diversi (Wang, Gao, & Fan, 2015): un primo vantaggio è rappresentato dall'elasticità con la quale le risorse all'interno del Cloud sono in grado di rispondere alle esigenze degli utenti, rispetto a servizi di hosting tradizionali. Quest'ultimi forniscono un numero limitato di risorse in un certo periodo di tempo, senza possibilità di adattarsi ai cambiamenti repentini che può subire la domanda; al contrario il Cloud Computing può rispondere istantaneamente ai cambiamenti dei requisiti informatici, permettendo agli utenti di avere sempre il controllo sull'utilizzo delle risorse. Inoltre, l'utilizzo di servizi basati sul Cloud comporta una riduzione sugli investimenti iniziali in infrastrutture hardware e software, essendo servizi forniti da un provider, e permette di ridurre altri costi, quali costi operativi o spese per il personale. Essendo servizi forniti esternamente all'azienda, vi è uno spostamento del rischio che è a carico del fornitore del servizio e non più a carico dell'azienda. Oltre al rischio dovuto al carico di lavoro, esiste la possibilità di subire la perdita di dati, dovuta al danneggiamento di hardware o software, scongiurata però dal fornitore del servizio con il backup dei dati o tramite metodologie per il recupero di quest'ultimi. Tutto questo si traduce in una riduzione di costi per l'azienda e un miglioramento dell'efficienza.

Esistono però dei limiti per quanto riguarda l'applicazione e la diffusione di questa tipologia di tecnologia: un rischio è rappresentato dalla sicurezza informatica e dalla privacy dei dati, che rappresenta un limite sia per gli utenti finali sia per i fornitori di servizi cloud, poiché le responsabilità variano a seconda della tipologia di servizio utilizzato. Un altro limite è rappresentato dalla poca competenza digitale e dall'insufficiente infrastruttura tecnologica presente ancora in molte aziende, ad esempio aziende di piccole dimensioni, le quali non permettono di usufruire in maniera corretta delle potenzialità legate a questa tecnologia (Wang, Gao, & Fan, 2015).

3.2.4. Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing (AM), spesso conosciuta anche con il nome di “Stampa 3D”, è un processo di fabbricazione automatizzato basato sull'aggiunta di materiale per ‘strati’ al fine di ottenere oggetti fisici tridimensionali in scala. Insieme alla “Subtractive Manufacturing”, come ad esempio la tornitura e la fresatura nel quale vi è una rimozione di materiale partendo da un oggetto di massa maggiore, e alla “Formative Manufacturing”, come ad esempio la forgiatura e la fusione nel quale il materiale di base viene deformato per ottenere l'oggetto ricercato, l'Additive Manufacturing rappresenta il terzo pilastro delle tecnologie della produzione (Gebhardt, 2011).

Un'ulteriore definizione di questa tipologia di tecnologia viene fornita dall'ASTM International, secondo cui l'Additive Manufacturing è *“un processo per ottenere oggetti a partire dai dati del modello 3D aggiungendo materiali solitamente strato per strato, metodologia opposta alla Subtractive Manufacturing”* (International, 2012).

Lo sviluppo della tecnologia di Stampa 3D inizia intorno al 1980 e da allora ha compiuto notevoli progressi, ritagliandosi un ruolo fondamentale all'interno del paradigma dell'Industria 4.0, rivoluzionando l'industria manifatturiera (Huang, Liu, Mokasdar, & Hou, 2013). Comprende al suo interno tutta una serie di tecnologie che permettono di ottenere oggetti fisici a partire dai dati di un modello virtuale, tramite processi automatizzati, con l'ausilio di computer, in grado di produrre oggetti fisici, mediante l'unione di materiale strato dopo strato, a partire da modelli di progettazione assistita da computer (CAD) e utilizzando una vasta varietà di materiali, quali plastici, metallici o biologici (Huang, Leu, Mazumder, & Donmez, 2015).

Un processo di produzione tramite l'utilizzo della tecnologia AM può essere scomposto principalmente in tre step (Huang, Liu, Mokasdar, & Hou, 2013), come è possibile vedere in Figura 13:

- 1) Si sviluppa un modello 3D utilizzando un computer che verrà poi convertito in un file con formato standard AM;
- 2) Il file viene a questo punto inviato ad un macchinario AM dove subisce alcune modifiche, ad esempio cambiando la posizione del pezzo o scalando il pezzo, per adattarsi alle caratteristiche richieste;
- 3) Infine, l'oggetto viene realizzato strato dopo strato sul macchinario.

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

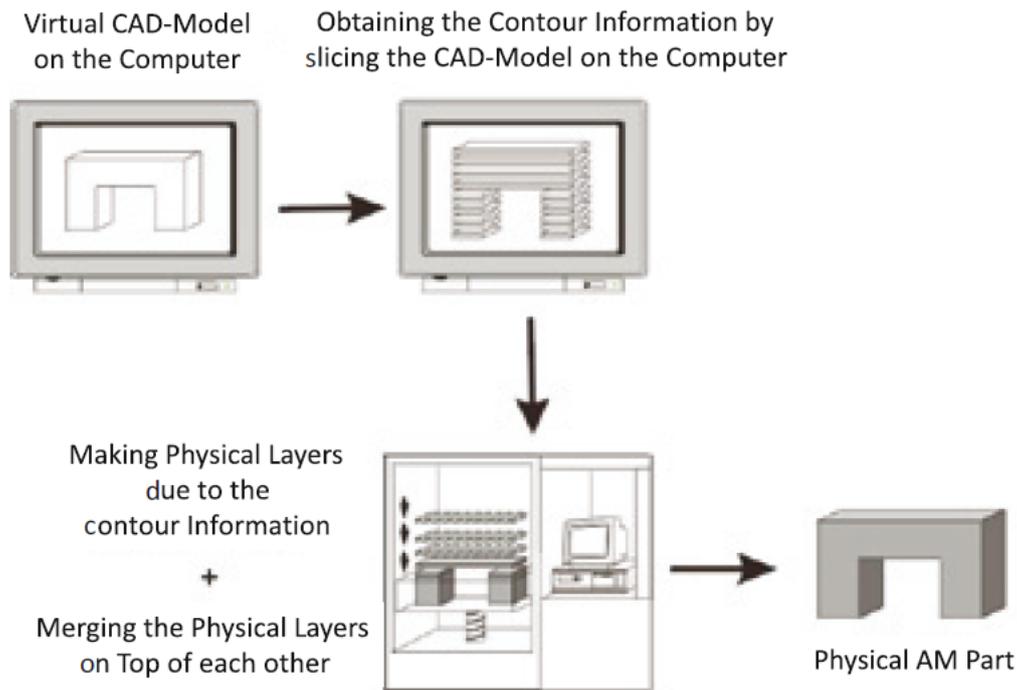


Figura 13: Processo di fabbricazione con Additive Manufacturing (Gebhardt, 2011)

Questo metodo di produzione offre notevoli vantaggi ma al contempo presenta alcuni limiti, entrambi gli aspetti di fondamentale importanza nel contesto delle applicazioni industriali. Uno dei principali vantaggi ottenuti dall'utilizzo dell'Additive Manufacturing è rappresentato dalla notevole libertà di design, permettendo la creazione di strutture complesse che sarebbero difficili o impossibili da realizzare con metodi di produzione convenzionali. Questa tecnologia è particolarmente vantaggiosa per la produzione di prodotti personalizzati in piccoli lotti, ideale per applicazioni come le protesi mediche o i componenti aerospaziali, che richiedono una grande specificità. Inoltre, l'AM è capace di ridurre significativamente gli sprechi di materiale, utilizzando solo la quantità necessaria per costruire l'oggetto, e di accelerare i cicli di produzione eliminando molte fasi intermedie tra la progettazione e la produzione effettiva. Un altro vantaggio significativo è la riduzione dei costi associati a utensili e stampi, che in produzioni tradizionali rappresentano un investimento iniziale considerevole. L'AM permette anche di integrare più funzionalità in un unico pezzo, riducendo la necessità di assemblaggio e aumentando la complessità funzionale dei componenti (Mellor, Hao, & Zhang, 2014) (Ahuja, Karg, & Schmidt, 2015).

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

Tuttavia, l'Additive Manufacturing presenta anche delle sfide. I costi associati alle macchine e ai materiali per l'AM possono essere elevati. Vi sono anche limitazioni relative ai materiali che possono essere utilizzati, con implicazioni sulle proprietà meccaniche e termiche dei prodotti finiti. La qualità superficiale degli oggetti stampati in 3D può richiedere lavorazioni post-stampa per raggiungere la finitura desiderata, a causa di potenziali rugosità o irregolarità. La velocità di produzione, sebbene vantaggiosa per i prototipi e piccoli lotti, può non essere competitiva con le tecniche di produzione tradizionali, che consentono di ottenere volumi più elevati. Le dimensioni dei pezzi sono un altro limite, in quanto sono condizionate dalle dimensioni della macchina di stampa. Infine, le proprietà meccaniche dei pezzi prodotti possono variare significativamente rispetto a quelli ottenuti con metodi tradizionali, influenzate dall'orientamento delle fibre e dalla natura stratificata del processo (Huang, Liu, Mokasdar, & Hou, 2013) (Ahuja, Karg, & Schmidt, 2015).

3.2.5. Augmented Reality

L'Augmented Reality (AR) sta emergendo come una delle tecnologie fondamentali nell'ambito dell'Industria 4.0, offrendo soluzioni innovative per il miglioramento dei processi produttivi e operativi. Le sue origini possono essere tracciate indietro fino agli esperimenti visionari di Ivan Sutherland negli anni '60, quando creò il primo sistema di realtà virtuale e aumentata. Sutherland sviluppò un casco che proiettava immagini semplici in un ambiente tridimensionale, segnando il primo passo verso quello che oggi conosciamo come AR. Tuttavia, il concetto di AR come viene inteso oggi è emerso nei primi anni '90, quando i ricercatori Thomas Caudell e David Mizell, lavorando per Boeing, introdussero l'uso di display head-up per guidare gli operai nell'assemblaggio di cablaggi aerei. Questi sistemi proiettavano informazioni digitali direttamente nel campo visivo dell'operatore, facilitando compiti complessi senza la necessità di consultare manuali cartacei. Questa innovazione rappresentò un significativo passo avanti per l'utilizzo dell'Augmented Reality in ambienti industriali (Fraga-Lamas, Fernandez-Carames, Blanco-Novoa, Oscar, & Vilar-Montesinos, 2018).

Attualmente, l'AR è impiegata in un'ampia varietà di settori, inclusi quelli della manutenzione, della formazione e dell'assistenza remota, fornendo supporto visivo che migliora l'interazione umano-macchina e aumenta l'efficienza operativa. Questa evoluzione della tecnologia dimostra non solo l'avanzamento tecnologico ma anche una

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

crescente integrazione dell'AR nelle attività quotidiane, promettendo ulteriori innovazioni e applicazioni in futuro (Paelke, 2014).



Figura 14: esempio di Augmented Reality presso la compagnia SAP (Horejsi, 2015)

Questa tecnologia integra informazioni digitali con l'ambiente fisico, facilitando una sinergia ottimale tra l'operatore umano e le macchine attraverso la visualizzazione contestuale e immediata delle informazioni necessarie. In questo contesto, l'AR contribuisce significativamente all'aumento dell'efficienza operativa, riducendo i tempi di formazione e i tempi di inattività delle macchine. Offrendo istruzioni visive direttamente nel campo visivo dell'utente, la tecnologia minimizza gli errori e accelera le operazioni di manutenzione e assemblaggio, migliorando la precisione e la qualità dell'esecuzione. Uno degli aspetti più rilevanti dell'AR è il suo impatto sulla formazione dei lavoratori. La capacità di simulare interazioni complesse o pericolose senza i rischi associati permette una formazione immersiva e diretta, migliorando la sicurezza e la comprensione durante l'apprendimento. Questo si traduce in un'accelerazione del processo di formazione e in un aumento della competenza nel maneggiare attrezzature complesse o eseguire compiti delicati (Azuma, 1997).

Dal punto di vista economico, l'utilizzo di tecnologie AR ha dimostrato di poter portare ad una riduzione dei costi operativi attraverso la diminuzione degli errori di produzione

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

e ad un significativo miglioramento dal punto di vista dell'efficienza. La manutenzione preventiva, facilitata dalla visualizzazione di dati in tempo reale, può ulteriormente ridurre i costi associati a guasti improvvisi e fermi macchina. Inoltre, l'ergonomia migliorata nei posti di lavoro, ottenuta tramite la progettazione di interfacce utente che riducono la necessità di movimenti ripetitivi o scomodi, migliora il benessere dei lavoratori e riduce il rischio di infortuni. L'integrazione dell'AR con i sistemi di gestione dell'industria consente una visualizzazione immediata e intuitiva dei dati di produzione, facilitando decisioni rapide e informate. La personalizzazione delle interfacce AR in base al livello di esperienza e alle preferenze degli operatori può aumentare ulteriormente la soddisfazione e la produttività del lavoratore, rendendo l'AR uno strumento versatile e adattabile alle esigenze individuali (Fraga-Lamas, Fernandez-Carames, Blanco-Novoa, Oscar, & Vilar-Montesinos, 2018).

Tuttavia, nonostante i numerosi vantaggi, l'AR presenta anche alcune sfide e limitazioni. La dipendenza dalla tecnologia e dalle infrastrutture di supporto, come sensori e connettività adeguata, può rappresentare una barriera all'adozione in ambienti meno tecnologicamente avanzati. Inoltre, questioni di comfort e l'adattamento degli utenti agli strumenti AR possono richiedere un periodo di formazione e, in alcuni casi, possono verificarsi effetti collaterali come il disagio visivo o il disorientamento (Fraga-Lamas, Fernandez-Carames, Blanco-Novoa, Oscar, & Vilar-Montesinos, 2018) (Paelke, 2014).

3.2.6. Cyber-Security

Con il continuo sviluppo delle tecnologie fondamentali per la diffusione del paradigma dell'Industria 4.0 all'interno del settore manifatturiero, e più in generale all'interno della vita quotidiana dell'uomo, è nata la necessità di perfezionare e di rendere maggiormente sicuri tutti gli aspetti legati alla gestione, raccolta e archiviazione dei dati e delle informazioni che, attraverso il loro inarrestabile viaggio all'interno del mondo digitale, nutrono le molteplici operazioni e le macchine grazie alle quali nascono le Smart Factories (Abomhara & Koien, 2015). Attualmente, il concetto di Cyber-Security è un aspetto che ha guadagnato interesse ed importanza a livello globale. Diverse nazioni hanno, attraverso la pubblicazione di norme, direttive o regolamenti ufficiali, affrontato i problemi legati alla Cyber-Security e alla sua definizione: un esempio è riportato dal Regno Unito e dal loro innovativo Programma Nazionale sulla Cyber-Security (von Solms & van Niekerk, 2013). Nonostante questo, non tutte sembrano prestare particolare

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

attenzione alla differenza tra i concetti di Cyber-Security e di sicurezza delle informazioni.

La Cyber-Security viene definita dall'International Telecommunications Union (ITU) con la seguente descrizione (Union, 2024): *“La Cyber-Security è l'insieme di strumenti, politiche, concetti di sicurezza, misure di salvaguardia, linee guida, approcci alla gestione del rischio, azioni, formazione, best practices, garanzie e tecnologie che possono essere utilizzate per proteggere l'ambiente cibernetico e gli asset dell'organizzazione e dell'utente. Gli asset dell'organizzazione e dell'utente includono dispositivi di calcolo connessi, personale, infrastrutture, applicazioni, servizi, sistemi di telecomunicazioni e la totalità delle informazioni trasmesse e/o memorizzate nell'ambiente cibernetico. La Cyber-Security si impegna a garantire il raggiungimento e il mantenimento delle proprietà di sicurezza degli asset dell'organizzazione e dell'utente contro i rischi di sicurezza esistenti nell'ambiente cibernetico. Gli obiettivi generali di sicurezza comprendono i seguenti aspetti: disponibilità, integrità, che può includere autenticità e non ripudio, riservatezza”*.

Lo standard internazionale ISO/IEC 27002 del 2005 (Standard, 2005), precedentemente alla nascita della definizione di Cyber-Security, fornisce invece la definizione di sicurezza delle informazioni secondo la quale quest'ultima sia la protezione delle informazioni da una vasta gamma di minacce al fine di garantire la continuità operativa, minimizzare i rischi aziendali e massimizzare le opportunità di business. Le informazioni possono esistere in molte forme: possono essere stampate, scritte su carta, memorizzate elettronicamente, trasmesse per posta o trasmesse durante una conversazione. Inoltre, si fa riferimento a tre caratteristiche in particolare che devono essere assicurate: riservatezza, integrità e disponibilità delle informazioni, conosciute come “the CIA triangle” (confidentiality, integrity and availability) (von Solms & van Niekerk, 2013). Infine, esiste una sotto-categoria della sicurezza delle informazioni, nota come sicurezza delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT), che si occupa della protezione dei sistemi tecnologici su cui le informazioni vengono comunemente memorizzate e trasmesse.

Partendo dalle definizioni citate in precedenza, emerge chiaramente come i confini della Cyber-Security si estendano oltre il tradizionale concetto di sicurezza delle informazioni, ereditandone alcune caratteristiche essenziali quali disponibilità, riservatezza e integrità,

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

ma espandendone l'ambito di applicazione. Il termine "Cyber", che evoca il concetto di cyberspazio, si riferisce alle reti di comunicazione elettronica e agli ambienti virtuali, i quali sono stati notevolmente potenziati dall'avvento dell'Internet of Things. Questi ambienti richiedono un controllo e una protezione accurati per assicurare un flusso di dati e informazioni continuo e sicuro (Craigen, Diakun-Thiabault, & Purse, 2014). Le entità che necessitano di protezione dai vari rischi associati alla sicurezza informatica e ai sistemi aperti comprendono una vasta gamma di soggetti che possono essere raggiunti in qualsiasi momento attraverso il cyberspazio. Oggi, questi soggetti includono una moltitudine di organizzazioni, istituzioni, governi, individui, mezzi di trasmissione, dispositivi e macchine, i quali, grazie agli imponenti progressi tecnologici, risultano interconnessi in misura senza precedenti. Nel contesto industriale, numerose aziende hanno optato per avviare collaborazioni strategiche o per l'acquisizione di società specializzate in cybersecurity (Rubmann, et al., 2015). Questa scelta è motivata dalla necessità di proteggere le linee di produzione, i dispositivi, i dati e le strategie aziendali, che sono considerati fattori critici per il successo e fondamentali per mantenere un vantaggio competitivo nel mercato. Attraverso significativi investimenti in sicurezza informatica, le aziende sono in grado di garantire comunicazioni e trasmissioni di dati più sicure e affidabili, e di implementare sistemi efficaci per l'identificazione degli utenti che accedono ai sistemi, alle macchine e alle risorse aziendali più preziose. Ciò contribuisce notevolmente alla riduzione del rischio di attacchi e minacce, anche se è impossibile eliminarli completamente. Queste misure rappresentano un passo essenziale per rafforzare la resilienza aziendale di fronte alle crescenti sfide della sicurezza digitale (von Solms & van Niekerk, 2013).

3.2.7. Autonomous Robots

Nel contesto dell'Industria 4.0, i robot collaborativi, o cobots, emergono come un elemento cruciale grazie alla loro capacità di integrarsi armoniosamente con le tecnologie avanzate come l'Internet of Things, l'Intelligenza Artificiale e il Big Data e di lavorare in perfetta sinergia con gli operatori presenti all'interno del reparto industriale (Friis, 2016). All'interno dell'articolo "A conceptual framework to evaluate human-robot collaboration" (Gervasi, Mastrogiacomo, & Franceschini, 2020), un robot collaborativo viene definito come un dispositivo robotico che manipola oggetti in collaborazione con un operatore umano. Secondo lo standard ISO/TS 15066, un robot collaborativo è "un robot destinato a interagire fisicamente con gli umani in uno spazio di lavoro condiviso".

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

Questa definizione entra in contrasto con la definizione più classica di robot industriali, progettati per operare autonomamente e in spazi separati. I cobot possono avere molti ruoli, ad esempio possono essere capaci di lavorare insieme agli umani in un ambiente d'ufficio oppure operare in stazioni di lavoro industriali senza barriere protettive. L'obiettivo di questi robot è supportare e sollevare gli umani attraverso un lavoro congiunto (Gervasi, Mastrogiacomo, & Franceschini, 2020). Questi dispositivi sono dotati di sensori intelligenti e capacità di connettività che permettono una comunicazione continua con altri sistemi digitali, facilitando così una gestione ottimizzata dei processi, la manutenzione predittiva e l'adattamento in tempo reale ai cambiamenti produttivi. A differenza dei robot tradizionali, configurati per operazioni specifiche e immutabili, i cobots si distinguono per la loro flessibilità e facilità di riconfigurazione (Heyer, 2010) (Fast-Berglund, Palmkvist, Nyqvist, Ekered, & Akerman, 2016).

Con l'introduzione di questa tipologia di robot industriali, sorge la necessità di esplorare il concetto di Collaborazione Uomo-Robot (HRC). L'idea principale della Collaborazione Uomo-Robot è combinare le capacità degli esseri umani con quelle dei robot. Da un lato, gli esseri umani possiedono flessibilità innata, intelligenza, destrezza e capacità di risoluzione dei problemi; dall'altro lato, i robot offrono precisione, potenza e ripetibilità. L'implementazione dell'HRC introduce diverse problematiche legate principalmente alla sicurezza, alla programmazione dei robot, all'organizzazione dei compiti e agli aspetti legati agli esseri umani (Gervasi, Digiario, Mastrogiacomo, Maisano, & Franceschini, 2020). L'implementazione dell'HRC introduce diverse problematiche legate principalmente alla sicurezza, comunicazione, organizzazione dei compiti, aspetti sociali e psicologici. Dal punto di vista della sicurezza, lavorare vicino ai robot, senza barriere, può introdurre nuovi rischi per gli umani (Gervasi, Mastrogiacomo, & Franceschini, A conceptual framework to evaluate human-robot collaboration, 2020).

L'interazione diretta tra uomo e macchina, con cobots progettati per operare accanto agli operatori umani senza necessità di barriere fisiche, rappresenta un altro aspetto fondamentale. Questi robot sono equipaggiati con sistemi avanzati di rilevamento che garantiscano la sicurezza, eliminando il bisogno di misure protettive invasive, quali ad esempio le cosiddette "celle di lavoro", e permettendo una collaborazione più stretta e sicura tra l'uomo e la macchina. Inoltre, i robot collaborativi sono strumenti leggeri e caratterizzati da una notevole flessibilità, permettendo agli operatori di spostare facilmente i cobots e di riprogrammarli per poter svolgere compiti diversi. Questa

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

collaborazione si riflette non solo nell'efficienza produttiva ma anche in un ambiente di lavoro migliorato e in una riduzione dei rischi lavorativi (Alami, 2013).

In Figura 15, è possibile osservare uno schema riassuntivo delle principali differenze tra i robot utilizzati nell'industria tradizionale e i cobots:



Figura 15: differenze tra robot tradizionali e cobots (Giacobone, 2024)

Tuttavia, l'introduzione dei cobots porta con sé anche delle sfide. Nonostante la loro accessibilità relativa e la facilità di implementazione, i robot collaborativi richiedono un investimento iniziale che può essere significativo (Friis, 2016). Inoltre, nonostante siano

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

generalmente più semplici da programmare rispetto ai robot industriali tradizionali, la programmazione dei cobots richiede comunque una competenza tecnica che può rappresentare una barriera per alcuni utenti. Infine, i cobots hanno limitazioni nelle capacità di carico e nell'esecuzione di compiti rispetto ai robot industriali più grandi e potenti, il che può limitare la loro applicabilità in certe situazioni (Heyer, 2010).

I robot collaborativi da un lato incarnano i principi dell'Industria 4.0 facilitando una transizione verso processi di produzione più intelligenti e integrati, dall'altro rappresentano un netto contrasto con i metodi dell'industria tradizionale. La loro implementazione promuove un ambiente di lavoro più flessibile e collaborativo, ma richiede un'attenta considerazione delle sfide tecniche e finanziarie associate.

3.2.8. Simulation

Con l'avanzamento delle tecnologie citate in precedenza, come l'IoT, i Big Data e il Cloud Computing, si è assistito ad un significativo rafforzamento nelle capacità, nella portata e nelle funzionalità del mondo virtuale all'interno del settore manifatturiero, rendendo possibile la creazione del cosiddetto Digital Twin ossia "gemello digitale". Il concetto di gemello digitale emerge come catalizzatore fondamentale per questa integrazione tra virtuale e mondo fisico, agendo come intermediario tra il mondo fisico e quello digitale e offrendo alle aziende manifatturiere innovative metodologie per implementare la produzione intelligente e la gestione di precisione (Qi & Tao, 2018).

Originariamente introdotto dal Dr. Michael Grieves (Grieves, 2015), il Digital Twin rappresenta un avanzamento tecnologico nel quale i modelli virtuali di oggetti fisici sono sviluppati digitalmente per simulare il loro comportamento in ambienti reali. Questo concetto si articola in tre componenti principali (Figura 16): le entità fisiche presenti nel mondo reale, i modelli virtuali nel mondo virtuale e i dati che collegano questi due mondi. Questo processo consente di valutare, analizzare, prevedere e ottimizzare le operazioni fisiche attraverso strumenti virtuali, materializzando di conseguenza i processi virtuali nel mondo reale.

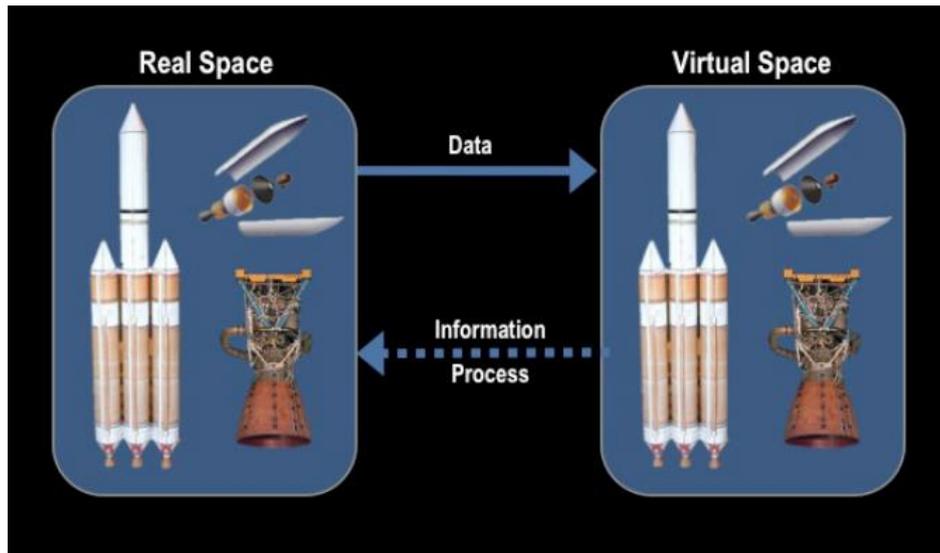


Figura 16: le tre componenti del Digital Twin (Grieves, 2015)

Dopo la simulazione e l'ottimizzazione dei processi di design, produzione e manutenzione, il gemello digitale orienta le operazioni fisiche verso l'attuazione delle soluzioni ottimizzate. Durante l'interazione tra i mondi virtuale e reale, l'integrazione dei dati si rivela una tendenza inevitabile: i dati raccolti nel mondo fisico vengono trasferiti ai modelli virtuali tramite sensori, completando così simulazioni, validazioni e aggiustamenti dinamici. Questi dati simulati sono successivamente reimmessi nel mondo fisico per adattarsi ai cambiamenti, migliorare le operazioni e incrementare il valore complessivo. L'impiego delle simulazioni 3D rappresenta un salto qualitativo nel settore industriale, superando i limiti e le difficoltà tipicamente incontrati nelle fabbriche tradizionali. Queste simulazioni sono prevalentemente impiegate nell'ambito dei materiali, dei prodotti e dei processi di progettazione e/o produzione. L'espansione di questo strumento alle operazioni relative agli impianti industriali rappresenta una sfida cruciale per il futuro. Le simulazioni, basate sull'utilizzo di dati in tempo reale, consentono l'analisi predittiva del comportamento di macchinari, sistemi e impianti, riflettendo il mondo reale in un modello virtuale che può integrare elementi come prodotti, macchine e operatori umani (Rubmann, et al., 2015).

La simulazione può essere estesa a tutto il ciclo di vita dei prodotti, trovando la sua massima utilità durante le fasi di sviluppo, in particolare nella progettazione. Questa tecnologia abilitante offre alle aziende notevoli vantaggi, come la significativa riduzione dei tempi e dei costi nelle fasi di progettazione e produzione. Inoltre, la capacità di

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

accedere a un vasto volume di dati e informazioni in tempo reale permette alle aziende di mantenere un vantaggio competitivo, facilitando l'adattamento dei prodotti per soddisfare le esigenze del cliente finale. L'uso di dati e informazioni derivanti dalla simulazione aiuta anche le aziende a prendere decisioni informate, accrescendo la conoscenza e le competenze interne. Il know-how aziendale, così potenziato, è riconosciuto come uno dei fattori critici di successo per le imprese moderne. Tuttavia, la diffusione di queste tecnologie incontra ostacoli legati alla necessità di disporre di sistemi di fabbrica innovativi e interconnessi, in linea con i progressi tecnologici attuali (Qi & Tao, 2018).

3.2.9. Horizontal/Vertical System Integration

Il paradigma dell'Industria 4.0 si articola attorno a tre dimensioni fondamentali: integrazione orizzontale attraverso l'intera rete di creazione del valore, l'integrazione digitale end-to-end lungo tutto il ciclo di vita del prodotto e infine l'integrazione verticale, che riguarda l'interconnessione dei sistemi produttivi (Stock & Seliger, 2016).

L'integrazione verticale, nell'ambito della produzione, dell'ingegneria dell'automazione e dell'IT, viene definita all'interno del documento pubblicato dal governo tedesco "Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0" (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013) e viene descritta come *"l'integrazione dei vari sistemi IT ai diversi livelli gerarchici (ad esempio, livelli di attuatori e sensori, controllo, gestione della produzione, esecuzione della produzione e pianificazione aziendale) al fine di fornire una soluzione end-to-end"*, collegandosi quindi alla definizione di integrazione digitale end-to-end, che viene definita all'interno del documento citato in precedenza come *"l'integrazione digitale all'interno di tutto il processo manifatturiero, in modo che il mondo digitale e quello reale siano integrati attraverso l'intera catena del valore di un prodotto e tra diverse aziende, incorporando al contempo i requisiti dei clienti"* (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013).

All'interno delle Smart Factories, quindi, l'integrazione verticale si manifesta attraverso la configurazione dei sistemi di produzione in rete (sistemi IT) dislocati su vari livelli gerarchici. Questi sistemi sono progettati per facilitare la produzione personalizzata, la quale mira a soddisfare specifiche esigenze dei clienti (Zhou, Liu, & Zhou, 2015). I sistemi informativi, sviluppati e gestiti mediante le tecnologie appartenenti al paradigma dell'Industria 4.0, permettono uno scambio di informazioni costante e bidirezionale. Da un lato, interagiscono con i fornitori per ottimizzare il processo di approvvigionamento,

3. Industria 4.0 (Quarta Rivoluzione Industriale)

minimizzando le inefficienze e stabilendo rapporti di collaborazione duraturi. Dall'altro, mantengono un contatto continuo con i clienti per offrire supporto post-vendita e monitorare l'efficacia dei prodotti anche dopo la loro uscita dal ciclo produttivo. Questa integrazione di tecnologie e processi è cruciale per costruire un sistema produttivo che sia reattivo che efficiente, in linea con le moderne aspettative del mercato (Liao, Deschamps, de Freitas Rocha Loures, & Ramos, 2017).

L'integrazione orizzontale viene invece definita come *“l'integrazione dei vari sistemi IT utilizzati nelle diverse fasi dei processi di pianificazione aziendale e manifatturiera, che coinvolgono uno scambio di materiali, energia e informazioni sia all'interno di un'azienda (ad esempio, logistica in entrata, produzione, logistica in uscita, marketing) sia tra diverse aziende (reti di valore)”* (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013). Questa integrazione implica una connessione tra una o più risorse e i diversi sistemi informativi che fanno parte della catena del valore. Tale collegamento facilita non solo la cooperazione tra le imprese che appartengono alla stessa filiera o che operano in settori affini, ma permette anche la fornitura di prodotti o di servizi in tempo reale. L'efficacia di questo approccio si manifesta nella capacità di sincronizzare le attività aziendali in modo ottimale, migliorando così la reattività e l'efficienza del sistema produttivo complessivo.

L'integrazione verticale e orizzontale, nell'ambito della produzione, dell'ingegneria dell'automazione e dell'IT, rivela significativi vantaggi per le imprese. In primo luogo, si osserva una riduzione delle inefficienze e degli scarti, risultato di un continuo scambio di dati e informazioni nei processi produttivi e aziendali, che favorisce anche il miglioramento del controllo dei processi e della garanzia della qualità (Stock & Seliger, 2016). Inoltre, l'adozione di tecnologie avanzate come l'IoT, migliora notevolmente la comunicazione, i flussi di lavoro e la collaborazione sia all'interno dell'azienda sia con l'esterno, facilitando le interazioni tra fornitori, clienti e le varie funzioni della catena del valore aziendale. Infine, l'integrazione efficace dei dati e delle informazioni tra i diversi stakeholder aziendali accelera il time to market, grazie a una più incisiva pianificazione e progettazione della produzione che coinvolge più attori e risorse aziendali. Questi miglioramenti contribuiscono a un sistema produttivo più agile e responsive, in grado di rispondere rapidamente alle dinamiche di mercato e alle esigenze dei consumatori (Wang, Wan, Li, & Zhang, 2016).

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

Dopo aver definito il paradigma dell'Industria 4.0 è possibile ora addentrarsi nella caratterizzazione della più recente Rivoluzione Industriale: il paradigma dell'Industria 5.0, che, a differenza della precedente, è legata ad aspetti maggiormente dedicati alla sostenibilità e al benessere sociale, piuttosto che all'uso esclusivo della tecnologia per migliorare l'efficienza e la produttività.

4.1. Definizione e caratteristiche

La prima definizione di Industria 5.0 viene fornita da Michael Rada, conosciuto anche come il fondatore del paradigma dell'Industria 5.0, che ha introdotto il termine nel dicembre 2015, in un articolo intitolato "Industry 5.0 - From Virtual to Physical" (Rada, 2015). All'interno dell'articolo, Rada discute sul fatto che l'Industria 4.0 ha marginalizzato l'elemento umano, considerandolo un "collo di bottiglia", sottolineando la necessità di sviluppare un sistema che favorisca la collaborazione tra uomo e macchina, utilizzando strumenti quali mani, computer, scanner 3D e stampanti, non per sostituire, ma per collaborare attivamente con l'essere umano. Questo approccio viene definito "Industrial Upcycling", con enfasi sul fatto che gli strumenti e l'ambiente industriale non sono virtuali ma fisici.

Dopo questa prima definizione, numerosi ricercatori, imprese ed entità governative hanno iniziato a discutere dell'Industria 5.0, nel tentativo di delineare una definizione del concetto e di comprendere le similitudini e le differenze rispetto al paradigma di Industria 4.0 e alle tecnologie abilitanti.

Nel maggio del 2016, Esben H. Østergaard, fondatore dell'azienda 'Universal Robots', pubblicò un articolo dal titolo "Industry 5.0 – Return of the human touch". All'interno dell'articolo, Østergaard sostiene che, sebbene i robot siano particolarmente efficienti nelle procedure standardizzate, l'introduzione di un elemento distintivo e personalizzato in ogni prodotto è un'attività che richiede il coinvolgimento umano. Di conseguenza, l'autore evidenzia la necessità di reintegrare l'elemento umano nei processi produttivi (Østergaard, 2016).

Nel 2016, il Giappone ha introdotto per la prima volta il concetto di Society 5.0, in risposta al concetto di Industry 4.0 proposto dal governo tedesco. Questo approccio è stato avanzato da Keidanren, la principale associazione industriale del Giappone, e

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

successivamente adottato e promosso dal governo giapponese nel contesto del Quinto Piano Base per la Scienza e la Tecnologia (Fifth Science and Technology Basic Plan) (Hayashi, 2019). Questo programma mira a integrare lo spazio fisico con il cyberspazio, sfruttando il pieno potenziale delle nuove tecnologie per realizzare una società futura ideale (Aquilani, Piccarozzi, Abbate, & Codini, 2020).

Nello specifico, il Giappone, attraverso la pubblicazione di questa relazione, ha delineato la sua strategia per orientare i processi di innovazione tecnologica verso la realizzazione della proposta Society 5.0. Tale strategia pone l'innovazione tecnologica al centro dell'attenzione, riconoscendola non solo come un fattore di cambiamento nei processi e nelle strutture aziendali, ma anche come uno strumento essenziale per l'innovazione sociale. È stata pertanto enfatizzata l'importanza critica dell'innovazione tecnologica per facilitare la transizione verso Society 5.0. Il concetto di Society 5.0 verrà trattato con maggior dettaglio nei capitoli successivi (Aquilani, Piccarozzi, Abbate, & Codini, 2020).

Michael Rada, nel febbraio del 2017, pubblica un articolo intitolato "Industry 5.0 definition" nel quale descrive in maniera più dettagliata il paradigma dell'Industria 5.0, definendo che *"nonostante l'Industria 5.0 rappresenti il futuro, essa è già una tendenza penetrante verso un cambiamento dei processi che mira a una collaborazione più stretta tra uomo e macchina, e alla prevenzione sistematica degli sprechi. La priorità dell'Industria 5.0 è l'utilizzo efficiente della forza lavoro di macchine e persone in un ambiente sinergico"* (Rada, INDUSTRY 5.0 definition, 2017). Rada contrappone il concetto di Industria 4.0, incentrata sulla produzione di massa e su larga scala, a quello di Industria 5.0, che privilegia standard di vita elevati, creatività e qualità superiore.

All'interno dello stesso articolo, Rada introduce anche la metodologia 6R (Recognize, Reconsider, Realise, Reduce, Reuse, Recycle) e i principi L.E.D. (Logistics Efficiency Design), proponendoli come strumenti fondamentali per i principi di progettazione del paradigma dell'Industria 5.0 (Rada, INDUSTRY 5.0 definition, 2017). La metodologia 6R, una estensione dei principi 3R applicati soprattutto nel settore della gestione dei rifiuti, viene descritta come un modello di miglioramento aziendale che può essere orientato sia al miglioramento che all'innovazione dei processi aziendali. D'altra parte, i principi L.E.D. sono formulati per potenziare l'efficienza delle catene di fornitura globali e si fondano su trasparenza, condivisione dei profitti ed efficienza, con l'obiettivo di eliminare gli sprechi generati dalle relazioni commerciali standard contemporanee tra

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

acquirenti e venditori. All'interno dell'Industrial Upcycling vengono identificate quattro tipologie di sprechi: lo spreco fisico, che rappresenta i rifiuti effettivamente introdotti durante e dopo la produzione; lo spreco sociale, ovvero la forza lavoro non utilizzata, ad esempio dovuta alla disoccupazione; lo spreco urbano, rappresentato da aree industriali dismesse, spazi vuoti e infrastrutture inadeguate; infine, lo spreco di processo, come ad esempio la sovrapproduzione o il sovra stoccaggio (Demir & Cicibas, 2017). Complessivamente, questi strumenti sono applicabili sia internamente che esternamente al concetto di Industria 5.0, ad esempio in molti aspetti legati al business (Rada, INDUSTRY 5.0 definition, 2017).

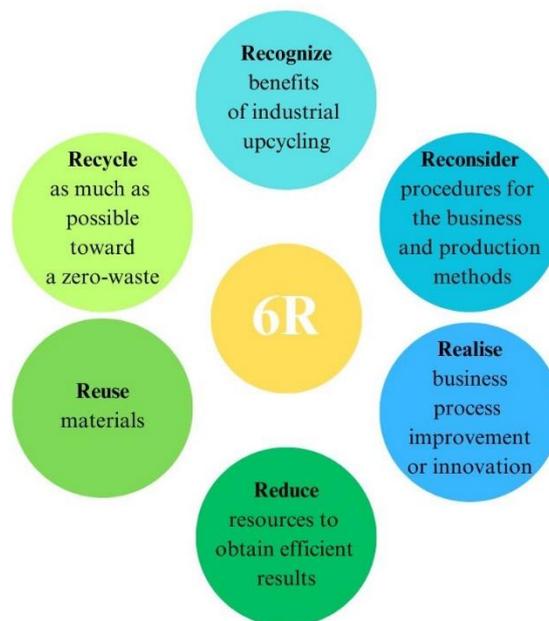


Figura 17: i principi 6R (Rada, INDUSTRY 5.0 definition, 2017)

All'interno dell'articolo intitolato "Industry 5.0: a survey on Enabling Technologies and Potential Applications" (Maddikunta, et al., 2022) vengono riprese tutta una serie di definizioni riguardanti il concetto di Industria 5.0 condivise da studiosi e ricercatori, di seguito riportate:

- *"Industry 5.0 is a first industrial evolution led by the human based on the 6R (Recognize, Reconsider, Realize, Reduce, Reuse and Recycle) principles of industrial upcycling, a systematic waste prevention technique and logistics*

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

efficiency design to valuate life standard, innovative creations and produce high-quality custom products.” (Rada, INDUSTRY 5.0 definition, 2017)

- *“Industry 5.0 brings back the human workforce to the factory, where human and machine are paired to increase the process efficiency by utilizing the human brainpower and creativity through the integration of workflows with intelligent systems.” (Nahavandi, 2019)*
- *“European Economic and Social committee states that the new revolutionary wave, Industry 5.0, integrates the swerving strengths of cyber-physical production systems (CPPS) and human intelligence to create synergetic factories. Furthermore, to address the manpower weakening by Industry 4.0, the policymakers are looking for innovative, ethical and human-centred design.” (Longo, Padovano, & Umbrello, 2020)*
- *“Industry 5:0 compels the various industry practitioners, information technologists and philosophers to focus on the consideration of human factors with the technologies in the industrial systems.” (Friedman & Hendry, 2019)*
- *“Industry 5:0 is the age of Social Smart factory where cobots communicate with the humans. Social Smart Factory uses enterprise social networks for enabling seamless communication between human and CPPS components.” (Koch, et al., 2017)*
- *“Industry 5.0, a symmetrical innovation and the next generation global governance, is an incremental advancement of Industry 4.0 (asymmetrical innovation). It aims to design orthogonal safe exits by segregating the hyperconnected automation systems for manufacturing and production.” (Leong, Tan, Chew, & Show, 2021)*

Le definizioni precedentemente riportate, possono essere sintetizzate attraverso quest'ultima caratterizzazione del concetto di Industria 5.0: l'Industria 5.0 è concepita come una soluzione progettuale centrata sull'essere umano, nella quale i cobot cooperano con le risorse umane per facilitare una produzione autonoma personalizzabile attraverso le reti sociali aziendali. Questo approccio consente una sinergia operativa tra uomo e macchina. I cobot, a differenza delle tradizionali macchine programmabili, sono capaci di percepire e comprendere la presenza umana. In questo contesto, i cobot vengono impiegati per eseguire compiti ripetitivi e lavori fisicamente impegnativi, mentre agli

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

esseri umani è affidata la gestione della personalizzazione e dell'elaborazione di pensieri critici e innovativi (il cosiddetto pensiero "out of the box") (Maddikunta, et al., 2022).

L'evoluzione del concetto di Industry 5.0 è stata notevolmente influenzata anche dalle agende politiche europee. Nel gennaio del 2021, la Commissione Europea ha pubblicato un documento intitolato "Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry". Per mantenere la competitività, l'industria europea deve perseguire l'innovazione. È essenziale investire in futuro per superare le sfide economiche poste dalle crisi mondiali (ad esempio, la pandemia dovuta al coronavirus) e sviluppare una "nuova normalità" caratterizzata da un'industria più sostenibile e consapevole delle questioni ambientali (Breque, De Nul, & Petridis, 2021). Il paradigma dell'Industria 5.0 si concentra su valori quali la centralità dell'essere umano, i benefici ambientali e sociali, piuttosto che sulle sole tecnologie. Questo cambio di paradigma è basato sull'idea che le tecnologie debbano essere plasmate per sostenere questi valori, piuttosto che il contrario, proponendo che la rivoluzione tecnologica sia guidata dalle esigenze della società piuttosto che viceversa (Muller, 2020).

Questo accresce la complessità e l'esigenza di un'accurata definizione delle politiche a livello di governance, con l'intento di meglio inquadrare e orientare le rivoluzioni in atto, massimizzando i loro benefici per la società europea e mitigando i rischi emergenti (Breque, De Nul, & Petridis, 2021). Questa necessità si riflette nelle priorità attuali della Commissione Europea: il "Green Deal", una strategia globale per rendere l'Europa neutra dal punto di vista climatico entro il 2050, e "Europe Fit for the Digital Age", che mira a potenziare l'innovazione tecnologica introducendo regole nuove e aggiornate per la tecnologia e l'economia digitale (Breque, De Nul, & Petridis, 2021). Inoltre, è fondamentale incoraggiare i consumatori a fare scelte informate riguardo alle tecnologie e ai prodotti che utilizzano, per migliorare la loro fiducia nelle nuove tecnologie. La fiducia individuale nelle tecnologie cresce insieme alla capacità di utilizzarle, il che richiede un ampio programma di formazione e aggiornamento delle competenze lungo le catene di fornitura (Muller, 2020). È evidente che, nonostante la Quarta Rivoluzione Industriale sia ancora in fase di sviluppo, sia stata considerata non adatta a rispondere alle attuali sfide economiche, sociali e ambientali. Di conseguenza, l'Unione Europea ha formalmente introdotto il concetto "Industry 5.0", che può essere vista come la reintroduzione di una dimensione centrata sull'umano, perduta all'interno del precedente paradigma dell'Industria 4.0. Basandoci sulle definizioni sopra citate, possiamo affermare

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

che l'Industria 5.0 rappresenti una trasformazione industriale guidata dall'essere umano, fondata sulla cosiddetta Smart Factory sociale, che integra l'intelligenza umana e la creatività con i sistemi digitali per migliorare l'efficienza dei processi, produrre prodotti personalizzati di alta qualità, e ridurre gli sprechi e gli impatti ambientali. Per realizzare ciò, l'industria deve trasformare i propri modelli di business e il proprio approccio mentale in maniera innovativa, tenendo in considerazione fattori quali il progresso e il benessere umano, la sostenibilità, la generazione di valore economico circolare e rigenerativo, e l'equità sociale sin dall'inizio (Breque, De Nul, & Petridis, 2021).

4.2. Principi fondanti dell'Industria 5.0

Come brevemente descritto all'interno del precedente capitolo, l'attuale ambizione europea si concentra nel posizionare il benessere del lavoratore al fulcro dei processi produttivi, impiegando contemporaneamente le innovazioni tecnologiche per promuovere una prosperità che trascenda l'occupazione e la crescita economica, nel rispetto dei limiti di sostenibilità del pianeta. All'interno della relazione "Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry" (Breque, De Nul, & Petridis, 2021) viene definito il concetto cardine sulla quale poggia l'intero paradigma dell'Industria 5.0, in particolare viene descritto come: *“Industry 5.0 recognises the power of industry to achieve societal goals beyond jobs and growth to become a resilient provider of prosperity, by making production respect the boundaries of our planet and placing the wellbeing of the industry worker at the centre of the production process”* (Breque, De Nul, & Petridis, 2021).

Da questa definizione è possibile estrarre i tre principi che caratterizzano il concetto di Industria 5.0: Human-Centricity, Sustainability e Resilience (Figura 18).

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

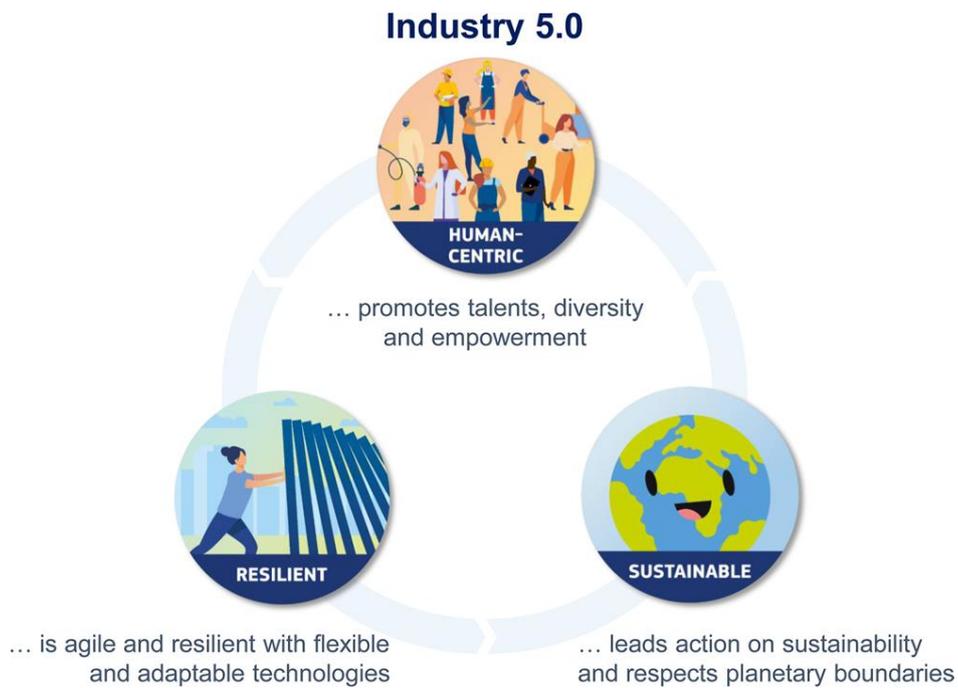


Figura 18: Principi fondanti dell'Industria 5.0 (Xu, Lu, Vogel-Heuser, & Wang, 2021)

4.2.1. Human Centricity

Uno degli aspetti fondamentali è legato ad uno spostamento di pensiero dovuto al passaggio da un approccio esclusivamente guidato dalla tecnologia ad un sistema che colloca le necessità e gli interessi umani fondamentali al centro del processo produttivo, spostando l'accento verso un'ottica profondamente focalizzata sull'uomo e sulla società (Breque, De Nul, & Petridis, 2021). Di conseguenza, i lavoratori del settore industriale assumeranno nuovi ruoli, testimoniando una riconfigurazione del valore attribuito al lavoratore, che da essere visto come "costo", può diventare "investimento". La tecnologia dovrebbe essere al servizio delle persone e della società, implicando che gli strumenti tecnologici impiegati nella manifattura siano adattabili alle necessità e alla varietà dei lavoratori del settore. Si deve garantire la creazione di un ambiente lavorativo sicuro e inclusivo che prioritizzi la salute fisica e mentale, salvaguardando fundamentalmente i diritti essenziali dei lavoratori, quali l'autonomia, la dignità umana e la privacy. D'altro canto, è fondamentale che i lavoratori persistano nell'acquisizione e nel rinnovamento delle competenze, al fine di migliorare le prospettive di carriera e l'equilibrio tra vita lavorativa e personale (Xu, Lu, Vogel-Heuser, & Wang, 2021).

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

Questa nuova direzione intrapresa dalle aziende porta a tre principali benefici per i lavoratori (Breque, De Nul, & Petridis, 2021):

- Un nuovo ruolo per il lavoratore industriale → Nel contesto dell'Industria 5.0, si assiste a una significativa trasformazione del ruolo e della percezione del lavoratore industriale. Non più visto semplicemente come un costo operativo, il lavoratore è ora considerato un investimento strategico per l'azienda. Questa visione implica un impegno da parte del datore di lavoro nell'investire nelle competenze, nelle capacità e nel benessere dei propri dipendenti. Inoltre, un presupposto fondamentale per l'Industria 5.0 è che la tecnologia debba essere al servizio delle persone. In ambito industriale, ciò si traduce nell'adattamento della tecnologia impiegata nella produzione alle esigenze e alla diversità dei lavoratori, evitando che questi ultimi debbano adeguarsi continuamente a tecnologie in costante evoluzione. Per realizzare tali obiettivi, è essenziale che i lavoratori partecipino attivamente alla progettazione e all'implementazione delle nuove tecnologie industriali, compresi la robotica e l'intelligenza artificiale (Breque, De Nul, & Petridis, 2021).
- Un ambiente di lavoro più sicuro e inclusivo → Una delle preoccupazioni maggiori legate all'introduzione di nuove tecnologie riguarda il timore della perdita di posti di lavoro. Tuttavia, un'applicazione adeguata di queste tecnologie offre il potenziale di trasformare i luoghi di lavoro in ambienti più inclusivi e sicuri, migliorando contestualmente la soddisfazione e il benessere dei lavoratori. I robot, ad esempio, potrebbero prendere in carico compiti ripetitivi e meno complessi, incrementando la sicurezza dei lavoratori. Le tecnologie IA, insieme agli strumenti di realtà aumentata e virtuale, possono facilitare i lavoratori nell'esecuzione di mansioni specializzate che richiederebbero altrimenti competenze e formazioni specifiche. La progressiva digitalizzazione della forza lavoro apre un ventaglio di nuove opportunità. La digitalizzazione dei processi industriali rende possibile il lavoro a distanza, consentendo anche a chi risiede in aree remote di accedere al mercato del lavoro e aumentando la resilienza della produzione. La recente crisi del Covid-19 ha evidenziato chiaramente il potenziale dell'operatività remota digitalizzata, messa alla prova dalle misure di distanziamento fisico che hanno compromesso il funzionamento di molte imprese. Oltre alla salute fisica, è essenziale considerare anche il benessere mentale dei

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

lavoratori nella progettazione di ambienti di lavoro digitalizzati. È fondamentale sottolineare che tali miglioramenti non possono avvenire a discapito dei diritti fondamentali dei lavoratori. L'autonomia, la dignità umana, la privacy e la salute, sia fisica che mentale, non devono essere compromesse in nessuna fase del processo di adattamento al progresso tecnologico (Breque, De Nul, & Petridis, 2021).

- Competenze, aggiornamento e riqualificazione → Anche l'analisi delle competenze emerge come elemento cruciale nell'ambito dell'Industria 5.0, data la rapida evoluzione delle necessità di competenze digitali in parallelo con le innovazioni tecnologiche. Attualmente, le industrie europee si trovano a fronteggiare una significativa scarsità di competenze, una sfida che le istituzioni formative e educative stanno faticando a soddisfare. Tale problematica interessa sia le competenze digitali generali che quelle più specialistiche. Per colmare questo divario tra le competenze disponibili e quelle richieste, si propone l'adozione di un nuovo paradigma nello sviluppo tecnologico. Potrebbe essere vantaggioso rendere la tecnologia più intuitiva e accessibile, in modo che il suo utilizzo non richieda competenze avanzate. In parallelo, si dovrebbe sviluppare un percorso formativo congiunto con l'evoluzione tecnologica, assicurando così una maggiore congruenza tra le competenze disponibili e quelle necessarie nel settore industriale. È fondamentale accettare che non è possibile garantire un aggiornamento professionale per ogni singolo lavoratore del settore industriale. Con l'avanzamento dell'automazione, alcune competenze diventeranno inevitabilmente obsolete e quindi più complesse da sviluppare. Di conseguenza, è essenziale agevolare una transizione nelle qualifiche di alcuni lavoratori, ovvero procedere alla loro riqualificazione. Questo processo riguarda spesso le competenze digitali, che potrebbero non essere state parte dei programmi di studio. Oltre all'importanza delle competenze digitali, è rilevante considerare che queste non sono le sole competenze necessarie per i lavoratori delle fabbriche del futuro. Il World Manufacturing Forum (Figura 19) ha delineato una lista delle dieci competenze più rilevanti per la manifattura futura. Interessante notare che solo quattro di queste competenze sono direttamente legate al digitale. Le altre competenze necessarie sono di tipo trasversale e riguardano la capacità di pensiero creativo e imprenditoriale (Breque, De Nul, & Petridis, 2021).

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)



Figura 19: le dieci competenze identificate all'interno del World Manufacturing Forum Report (Foundation, 2019)

4.2.2. Sustainability

Il secondo principio fondamentale dell'Industria 5.0, come definito dalla Commissione Europea, afferma che l'industria deve perseguire la sostenibilità per rispettare i limiti del pianeta. È richiesto alle imprese di sviluppare "*processi circolari capaci di riutilizzare, riproporre e riciclare le risorse naturali, minimizzare i rifiuti e l'impatto ambientale*". La sostenibilità è concepita come un insieme di azioni volte a promuovere un modello economico circolare, con l'obiettivo di ridurre il consumo energetico, le emissioni di CO2 e la gestione dei rifiuti, senza compromettere le necessità delle future generazioni. L'adozione di nuove tecnologie si presenta come soluzione per migliorare l'efficienza e l'efficacia nella gestione delle risorse (Breque, De Nul, & Petridis, 2021). Le innovazioni nelle tecnologie, insieme alle iniziative dell'UE, volte a digitalizzare l'industria europea,

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

inclusi un migliore impiego dei Big Data e dell'Intelligenza Artificiale, sono ormai una realtà e stanno trovando sempre maggiore applicazione nel settore industriale. Di fronte alle crescenti preoccupazioni ambientali e sociali del pubblico, le aziende stanno integrando la sostenibilità nei loro modelli di business.

4.2.3. Resilience

Il concetto di "Resilienza" allude all'impellente necessità di incrementare la robustezza della produzione industriale, rafforzandola contro interruzioni e assicurando la sua capacità di fornire e mantenere le infrastrutture durante periodi di crisi. La vulnerabilità del nostro attuale modello di produzione globalizzato viene messa in luce da dinamiche (geo-)politiche e calamità naturali, come evidenziato dall'epidemia di Covid-19 (Breque, De Nul, & Petridis, 2021). Tale vulnerabilità necessita di essere controbilanciata attraverso lo sviluppo di catene di valore strategicamente resilienti, capacità produttive adattabili e procedure aziendali flessibili, particolarmente in quei settori che rispondono a bisogni umani fondamentali quali la sanità o la sicurezza. Inoltre, è cruciale che l'industria del futuro sviluppi una resilienza tale da permetterle di navigare agilmente tra i cambiamenti (geo-)politici e le emergenze naturali. Questo implica un riorientamento strategico che posizioni la resilienza come una prerogativa essenziale per la sostenibilità a lungo termine dell'industria in un contesto globale caratterizzato da incertezze e rapidi cambiamenti (Xu, Lu, Vogel-Heuser, & Wang, 2021).

4.3. Tecnologie abilitanti

All'interno del paradigma dell'Industria 5.0 vengono definite alcune tecnologie abilitanti, così come era stato fatto per la definizione dell'Industria 4.0, che riprendono in parte le tecnologie citate nella precedente Rivoluzione Industriale e le contestualizzano all'interno del contesto nel quale l'Industria 5.0 opera. Queste tecnologie abilitanti configurano l'Industria 5.0 come un modello di produzione avanzato, con un particolare focus sull'interazione tra macchine ed esseri umani. Le macchine intelligenti sono progettate per collaborare attivamente con gli umani, rendendo questo lavoro congiunto un mezzo per esaltare le capacità umane, rendendole significativamente più produttive e facilmente automatizzabili per individui e piccole imprese, più di quanto non sia mai stato possibile in precedenza (Maddikunta, et al., 2022). In Figura 20 è possibile osservare una schematizzazione di queste tecnologie.

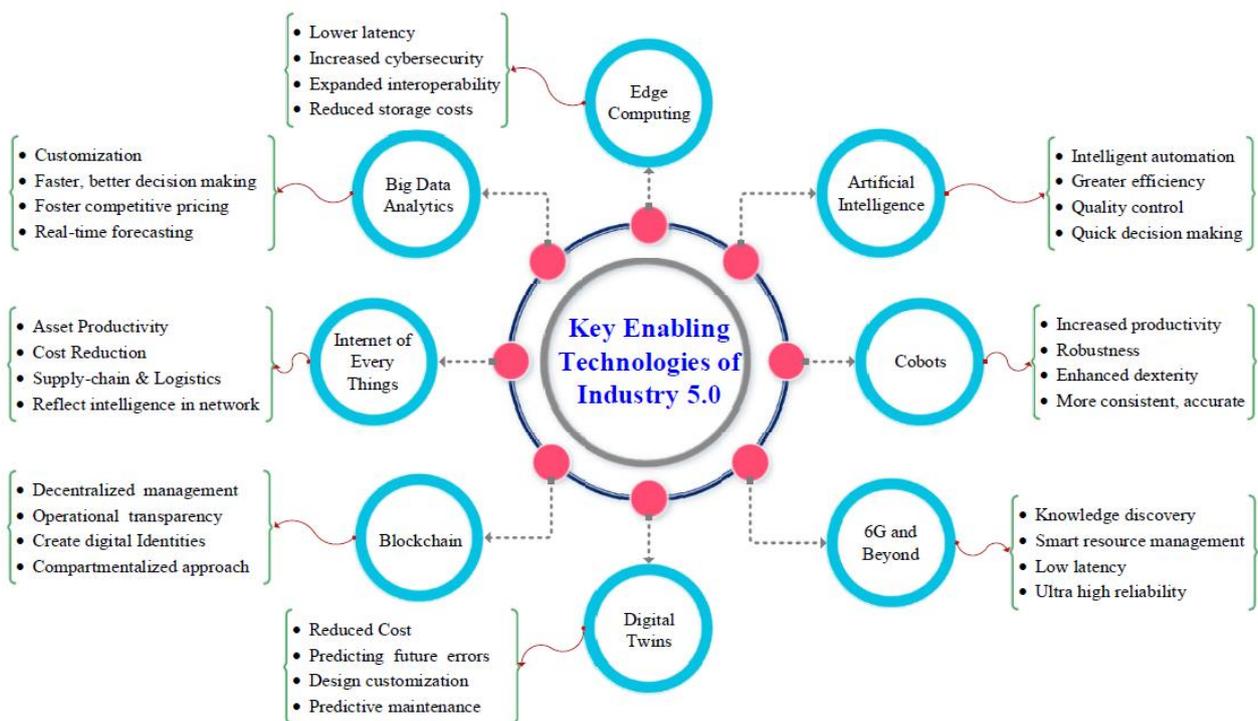


Figura 20: Tecnologie abilitanti dell'Industria 5.0 (Maddikunta, et al., 2022)

1. Edge Computing: L'Edge Computing (EC) emerge come una soluzione tecnologica capace di rispondere efficacemente alle aspettative relative ai costi di latenza, ai requisiti di tempo di risposta, nonché alla protezione dei dati e alla privacy. Questa tecnologia riduce il sovraccarico di comunicazione e assicura che le applicazioni siano efficaci anche in contesti geograficamente isolati (Enterprise,

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

2024). Una delle principali capacità dell'EC è quella di elaborare dati in prossimità della loro origine, evitando il trasferimento al cloud pubblico e, di conseguenza, riducendo significativamente i rischi per la sicurezza. L'EC può svolgere diverse funzioni cruciali come l'elaborazione dei dati, la gestione della coerenza della cache, nonché il trasferimento e la gestione delle richieste. Queste operazioni, essenziali per il mantenimento dell'integrità di rete, richiedono che l'infrastruttura di edge sia progettata con attenzione per garantire sicurezza, affidabilità e riservatezza delle informazioni (ZeroUno, 2024). Per applicazioni nell'ambito dell'Industria 5.0, l'EC garantisce bassa latenza, protezione dei dati e privacy, offrendo servizi ottimali agli utenti finali. Inoltre, l'EC facilita la comunicazione in tempo reale essenziale per le applicazioni industriali avanzate, come quelle previste nell'Industria 5.0, consentendo l'uso di risorse hardware e software più standard e accessibili per l'interazione e lo scambio di informazioni specifiche ai settori industriali. Questa tecnologia abilita inoltre l'analisi predittiva, promuovendo la rilevazione precoce di guasti nelle macchine e permettendo ai lavoratori di adottare decisioni informate e tempestive per prevenire o mitigare eventuali disservizi (Maddikunta, et al., 2022).

2. Intelligent or Adaptive Robots: I robot intelligenti o adattivi rappresentano la prossima generazione di robotica industriale, offrendo un livello superiore di automazione centrata sull'uomo nell'ambiente aziendale dell'Industria 5.0. I robot tradizionali, sebbene caratterizzati da elevata velocità e produttività, necessitano di essere isolati tramite barriere fisiche per motivi di sicurezza. Al contrario, i robot collaborativi sono stati progettati per lavorare in collaborazione con l'operatore umano in modo sicuro e senza l'ausilio di barriere fisiche, sebbene a scapito di una velocità inferiore e di un carico nominale ridotto. I robot intelligenti (adattivi) possono essere considerati un'evoluzione sia dei robot tradizionali che dei robot collaborativi. Questi robot sono altamente produttivi e capaci di adattarsi ad ambienti complessi e situazioni nuove, svolgendo un insieme più ampio di compiti complessi. Tra gli scenari applicativi dei robot adattivi nell'Industria 5.0 si annoverano l'assemblaggio di componenti di precisione, il trasporto di parti e l'assemblaggio avanzato. Si prevede che la diffusione dei robot adattivi crescerà significativamente nell'Industria 5.0, grazie al progresso continuo delle tecnologie di visione artificiale, cognizione della macchina, edge computing e intelligenza artificiale (Ghobakhloo, et al., 2023).

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

3. Internet of Everything: una prima definizione di IoE ci viene fornita dall'azienda Cisco, che propone l'Internet of Everything come *“un'aggregazione di persone, processi, dati e oggetti per rendere le connessioni di rete più rilevanti e preziose che mai, trasformando le informazioni in azioni che creano nuove capacità, esperienze più ricche e opportunità economiche senza precedenti per le imprese, gli individui e i paesi”* (Evans, 2012). L'IoE rappresenta l'interconnessione intelligente che si viene a creare tra persone, processi, dati e oggetti, attraverso l'utilizzo di sensori per rilevare, misurare e valutare il loro stato; tutti questi soggetti sono connessi tra loro tramite reti pubbliche o private che utilizzano protocolli standard e proprietari (Banafa, 2016). Mentre l'IoT rappresenta una singola transizione tecnologica concentrata sugli oggetti fisici, l'IoE abbraccia una serie di tecnologie, inclusa l'IoT, estendendo i propri confini (Evans, 2012). L'Internet of Things si concentra prevalentemente su elementi materiali, ovvero oggetti fisici interconnessi tramite Internet. Al contrario, l'Internet of Everything amplia questo concetto includendo tre componenti aggiuntive: le persone, i processi e i dati (Banafa, 2016). Nello specifico, IoE mira a migliorare la connettività tra individui in modi più significativi e proficui, a ottimizzare la distribuzione dei dati appropriati alla persona o all'entità giusta nel momento opportuno, e a facilitare decisioni più informate mediante la trasformazione dei dati in conoscenza utile. Questo sistema integrato abbraccia quindi non solo le quattro dimensioni della produzione, ma aspira anche a rivoluzionare l'approccio operativo e strategico delle imprese e degli individui, potenziando notevolmente il loro potenziale economico (Internet4Things, Internet of Everything, cos'è, come si differenzia dall'IoT, 2021). L'Internet of Everything si propone quindi come un'evoluzione dell'IoT, arricchendolo di dimensioni interpersonali e informazionali che valorizzano il tessuto produttivo e sociale. Nell'ambito dell'Industria 5.0, l'implementazione dell'Internet of Everything è in grado di innescare lo sviluppo di nuove funzionalità, arricchire l'esperienza utente e portare benefici significativi sia per le aziende che per i governi. In particolare, l'IoE contribuisce alla riduzione della latenza e all'eliminazione dei colli di bottiglia nei percorsi di comunicazione, fattori che conducono a una diminuzione delle spese operative. Inoltre, l'IoE facilita la riduzione degli sprechi nella catena di approvvigionamento e migliora l'efficienza delle operazioni di produzione. Questi miglioramenti si traducono in un incremento della fedeltà del cliente, ottenuto

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

attraverso la personalizzazione delle esperienze basata sull'analisi dei dati forniti. Questa integrazione avanzata di tecnologia e analisi dati, tipica dell'Industria 5.0, promuove un'ottimizzazione complessiva dei processi produttivi e di comunicazione, rafforzando così il rapporto tra le imprese e i loro clienti (Maddikunta, et al., 2022).

4. Blockchain: la tecnologia blockchain è definita come un sistema in cui un registro di transazioni effettuate in bitcoin o altre criptovalute viene mantenuto su più computer connessi in una rete peer-to-peer (Becher & Bheda, 2024). Questo database consente di memorizzare blocchi di dati criptati, concatenati in ordine cronologico, che garantiscono l'immutabilità e l'integrità dei dati. La tecnologia blockchain offre notevoli benefici aggiuntivi nell'ambito dell'Industria 5.0, data la sua capacità di facilitare la gestione decentralizzata di un elevato numero di dispositivi connessi, una sfida particolarmente rilevante in questo contesto industriale. La decentralizzazione è uno dei principi fondamentali della blockchain, poiché la rete non può essere controllata da un singolo computer o entità, ma piuttosto, è gestita da nodi che creano un registro distribuito (Becher & Bheda, 2024). Ogni dispositivo elettronico che conserva copie della blockchain e contribuisce al mantenimento della rete viene definito nodo. Questa architettura permette di progettare piattaforme di gestione che incentivano la fiducia distribuita. Le comunicazioni peer-to-peer sicure, garantite dalla blockchain, creano un registro immutabile che preserva i dati raccolti, supportando la trasparenza operativa e la responsabilità per le applicazioni industriali (Maddikunta, et al., 2022). Nell'ambito dell'Industria 5.0, la blockchain può promuovere trasparenza operativa, fiducia e responsabilità per gli eventi chiave. La tecnologia è impiegabile anche per generare identità digitali per persone e istituzioni, essenziali per la gestione degli accessi e l'autenticazione degli stakeholder in attività industriali su reti pubbliche. Queste identità possono ulteriormente estendersi alla gestione di proprietà, beni e servizi. La blockchain trova applicazione anche nella catalogazione e conservazione di opere originali e nella registrazione dei diritti di proprietà intellettuale. Facilitando l'automazione delle procedure di accordo tra diverse parti, la blockchain può semplificare significativamente il processo contrattuale. Inoltre, la manifattura cloud basata su blockchain consente la connettività a livello di macchina e lo scambio di dati, sfruttando le potenzialità di questa tecnologia (Maddikunta, et al., 2022).

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

5. 6G and Beyond: la tecnologia del 6G rappresenta il più recente sistema di comunicazione mobile con l'obiettivo di "fungere da rete neurale distribuita che fornirà collegamenti di comunicazione per fondere il mondo fisico con il mondo cibernetico" (Team, 2021). All'interno dell'articolo pubblicato da Huawei, è possibile riconoscere sei caratteristiche principali di questa nuova tecnologia: Native AI, Networked Sensing, Extreme Connectivity, Integrated NTN, Trustworthiness, Sustainability (Team, 2021). Uno degli aspetti innovativi del 6G è il "Networked Sensing", ovvero tecnologie di rilevamento wireless che sfruttano la trasmissione di onde radio, eco, riflessione e diffusione per analizzare l'ambiente fisico. Questo approccio è potenziato dall'aumento delle bande di frequenza, delle larghezze di banda e del numero di antenne, consentendo il rilevamento ad alta risoluzione, la localizzazione, l'imaging e la ricostruzione dell'ambiente, che a loro volta migliorano le prestazioni di comunicazione e ampliano le possibilità di servizio di rete, gettando le basi per una società digitale più intelligente. In termini di connettività, il 6G mira a offrire un'esperienza wireless ubiquitaria e di alta prestazione, paragonabile a quella delle fibre ottiche, accelerando e facilitando la trasformazione digitale completa e l'aggiornamento della produttività delle industrie attraverso servizi centrati sull'essere umano e la connessione di dispositivi (Team, 2021). All'interno del contesto dell'Industria 5.0, le reti 6G miglioreranno efficacemente le prestazioni delle applicazioni attraverso una gestione avanzata del cloud, soluzioni mobile EC alimentate da intelligenza artificiale e approcci innovativi alla mobilità. Si prevede che le reti 6G rispondano ai requisiti di una società dell'informazione intelligentemente avanzata, fornendo tassi di trasmissione dati estremamente elevati, latenze minime, affidabilità eccezionale, efficienza energetica ottimizzata e capacità di gestione del traffico avanzata (Maddikunta, et al., 2022).

4.3.1. Esempi Industria 5.0

Per poter comprendere le potenzialità del paradigma industriale 5.0, diversi studiosi hanno identificato delle possibili applicazioni, come è possibile osservare in Figura 21, che vengono riportate nel seguente paragrafo.

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

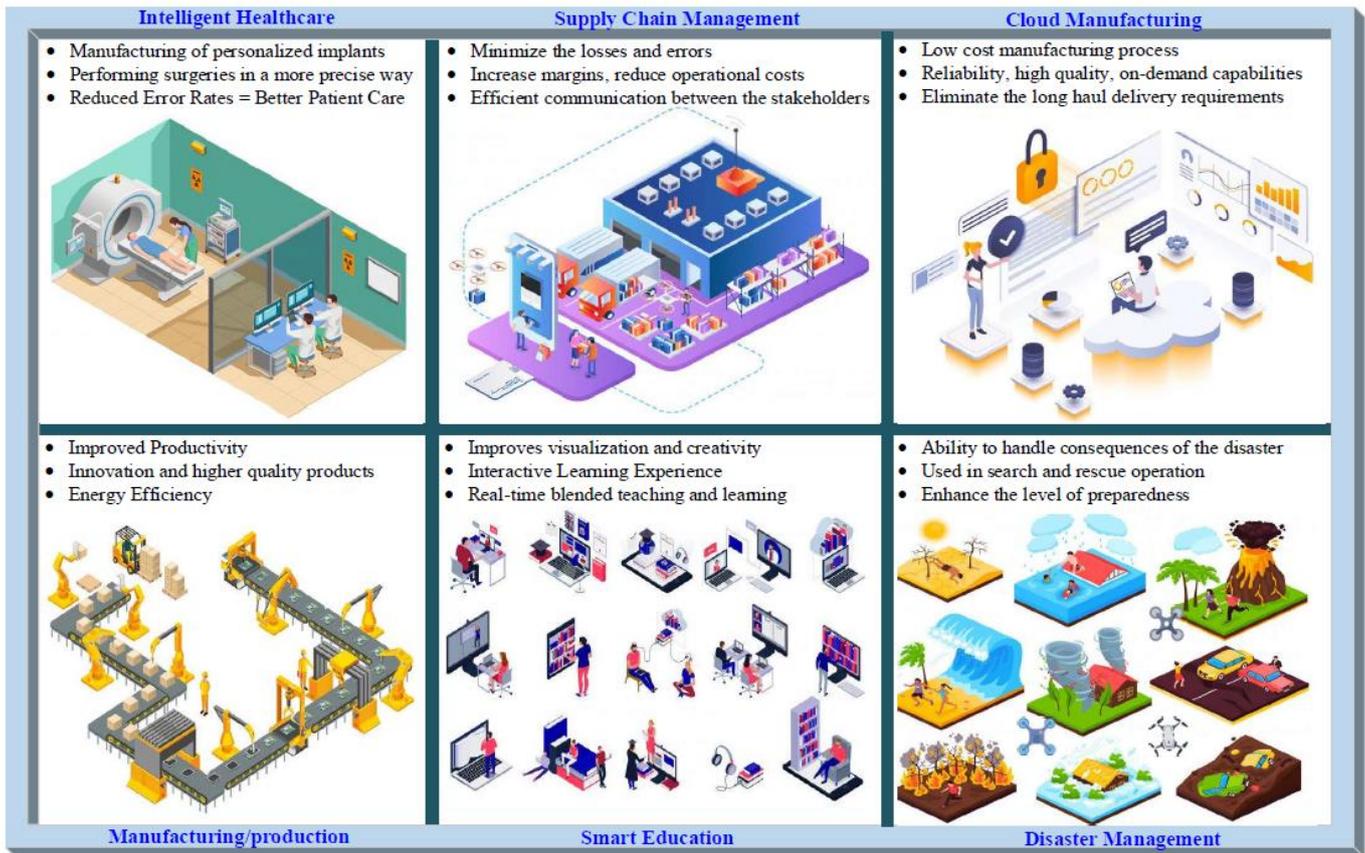


Figura 21: esempi di applicazioni industriali 5.0 (Maddikunta, et al., 2022)

Un primo esempio di utilizzo delle tecnologie citate in precedenza è rappresentato dalla rivoluzione significativa nell'ambito dell'assistenza sanitaria, volta a creare ospedali intelligenti. Questo paradigma industriale consente di fornire sistemi di monitoraggio da remoto, migliorando in modo sostanziale la vita dei medici e dei pazienti. I medici utilizzando modelli di intelligenza artificiale per la diagnosi delle malattie, sono in grado di migliorare l'accuratezza diagnostica e risparmiare tempo e risorse economiche. Inoltre, l'Industria 5.0 porta queste tecnologie a un livello superiore, soddisfacendo le esigenze di ciascun paziente. I dispositivi indossabili intelligenti, come gli smart watch, possono registrare costantemente i dati sanitari del paziente in tempo reale, memorizzandoli nel cloud. Gli algoritmi di apprendimento automatico analizzano questi dati per diagnosticare le condizioni mediche e fornire trattamenti personalizzati, avvisando i medici quando necessario. Un elemento chiave dell'Industria 5.0 è rappresentato dai cobot. Questi robot sono in grado di eseguire compiti di routine, come controlli medici, permettendo così ai medici di concentrarsi su attività più complesse (Maddikunta, et al., 2022). Durante la

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

pandemia di COVID-19, i cobot hanno dimostrato la loro utilità nel trattamento senza contatto dei pazienti, riducendo il rischio di esposizione per il personale sanitario. Inoltre, possono essere utilizzati per eseguire interventi chirurgici complessi con estrema precisione, grazie agli input costanti forniti dai medici. Le tecnologie utilizzate all'interno dell'Industria 5.0 giocano un ruolo cruciale in questo contesto. Il digital twin permette di simulare e ottimizzare i trattamenti, la blockchain garantisce la trasparenza operativa e la sicurezza dei dati, mentre l'intelligenza artificiale, con la sua capacità di apprendere dai dati e prevedere stati futuri, contribuisce a risultati di alta qualità ed efficienza. L'Industria 5.0 facilita anche la produzione di dispositivi medici personalizzati, come impianti ortopedici, che si adattano perfettamente alle esigenze dei pazienti. La stampa 3D, combinata con l'intelligenza artificiale, permette la creazione di protesi su misura, migliorando la qualità della vita dei pazienti. Oltre a migliorare le cure, l'Industria 5.0 ha un impatto significativo anche nell'educazione. Gli studenti di medicina possono beneficiare di tecnologie avanzate per la formazione, come i simulatori di interventi chirurgici basati su digital twin e virtual reality, che offrono un'esperienza di apprendimento pratica e sicura (Adel, 2022).

L'Industria 5.0 risulta essere impattante anche nella gestione della supply chain, integrando le tecnologie digitali con l'intelligenza e l'innovazione umana, consentendo alle industrie di offrire prodotti personalizzati e su misura a un ritmo più rapido. L'adozione di queste innovazioni supporta la gestione della catena di approvvigionamento (Supply Chain Management) nell'integrare la personalizzazione di massa nei sistemi di produzione, un concetto chiave dell'Industria 5.0. Attraverso il digital twin è possibile creare repliche digitali della SCM, comprendendo magazzini, risorse e logistica. Questa simulazione ingloba fabbriche, fornitori, strutture di distribuzione e sedi dei clienti, supportando l'intero ciclo di vita della SCM, dalla fase di progettazione, alla costruzione e messa in servizio, fino alle operazioni. Inoltre, utilizzando sensori IoT, vi è la costante raccolta di dati e informazioni dal mondo reale, che grazie all'utilizzo dell'intelligenza artificiale è possibile analizzare in maniera rapida per prevedere le difficoltà durante le varie fasi della SCM, permettendo alle industrie di adottare misure correttive preventive per minimizzare perdite ed errori. I cobot svolgono un ruolo cruciale nella SCM, eseguendo compiti regolari o pericolosi, come l'imballaggio, i controlli di qualità di routine e il sollevamento di oggetti pesanti, liberando così gli esseri umani per ruoli più complessi nel ciclo di vita della SCM (Adel, 2022). Attraverso l'uso dei cobot, le industrie

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

possono ridurre i costi totali e snellire i processi, migliorando la gestione dell'inventario, il tracciamento delle scorte, l'evasione degli ordini e il ritorno dei prodotti. L'Industria 5.0 mira a combinare ecosistemi digitali automatizzati e intelligenti con il tocco umano, valorizzando l'elemento umano all'interno del processo industriale per personalizzare le esperienze degli utenti finali e ottimizzare i flussi di lavoro. Tecnologie come l'intelligenza artificiale e l'automazione robotica stanno aiutando i dipendenti ad aumentare l'efficienza aziendale e a fornire un alto valore ai clienti in tempi più rapidi (Maddikunta, et al., 2022).

Un ulteriore esempio è l'applicazione dell'Industria 5.0 nel settore della produzione, combinando l'intelligenza umana e l'innovazione introdotta dalle tecnologie avanzate per incrementare la creatività e l'efficienza operativa, eliminando le attività faticose e ripetitive per i lavoratori umani e riducendo i tempi dei cicli di produzione. La produzione cloud è una tecnica innovativa che integra tecnologie avanzate per trasformare il paradigma tradizionale della produzione in un processo altamente efficiente e flessibile (Adel, 2022). Utilizzando il cloud, la virtualizzazione e le tecnologie orientate ai servizi, questo nuovo modello di produzione offre affidabilità, alta qualità, economicità e capacità on-demand. Il cloud controlla le apparecchiature e le procedure relative al ciclo di vita della produzione. I sensori IoT raccolgono dati sulle condizioni operative del processo di produzione, che vengono poi analizzati per ottimizzare l'efficienza e ridurre gli sprechi. La produzione cloud consente inoltre ai progettisti di proteggere i loro file memorizzandoli nel cloud con un robusto sistema di sicurezza e di utilizzare le risorse di produzione disperse in diverse aree geografiche, permettendo di posizionare gli impianti di produzione più vicino alle materie prime e alle aree con costi di produzione inferiori (Maddikunta, et al., 2022). L'Industria 5.0, come detto, enfatizza l'interazione tra esseri umani e macchine, sfruttando la collaborazione tra macchinari sempre più precisi e il potenziale innovativo degli esseri umani. Questo approccio mira a rendere la produzione sostenibile, sviluppando processi che riutilizzano e riciclano le risorse, riducendo al contempo gli impatti ambientali. L'additive manufacturing, una componente chiave dell'Industria 5.0, aumenta la personalizzazione e ottimizza l'efficienza delle risorse, riducendo gli sprechi. Eliminando i compiti ripetitivi per i lavoratori umani, l'Industria 5.0 sta rivoluzionando i sistemi di produzione a livello globale. L'implementazione dell'Industria 5.0 nelle industrie incrementa il valore aziendale e la soddisfazione dei consumatori. Combinando cobot ed esseri umani, si promuove la creatività e

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

l'innovazione sul posto di lavoro. Questa sinergia aumenta la produttività e l'efficienza operativa, riducendo i tempi dei cicli di produzione, diminuendo gli infortuni sul lavoro e creando nuove posizioni lavorative. Con l'Industria 5.0, la prossima generazione di sistemi di produzione cloud risponderà a esigenze diverse e complesse nei contesti di ingegneria, produzione e logistica. Questi sviluppi promettono di creare un ambiente produttivo più flessibile, efficiente e sostenibile, in grado di rispondere rapidamente alle esigenze del mercato globale (Maddikunta, et al., 2022).

4.4. Società 5.0

Parallelamente all'introduzione del concetto di Industria 5.0, vi è la necessità di contestualizzare e introdurre un nuovo modello di società, che deve essere in grado di rispondere rapidamente ai cambiamenti portati dal continuo evolversi delle tecnologie citate finora: nasce così il concetto di "Society 5.0" o "Super-smart society", introdotto in Giappone nel 2016 dalla società Keidanren (Federation, 2016). Il concetto di società riflette le rivoluzioni industriali e tecnologiche che si sono susseguite, portando alla progressiva evoluzione delle strutture sociali ed economiche.

La prima fase, conosciuta come "Society 1.0" o "Società della Caccia e della Raccolta", era caratterizzata da una società basata sulla caccia e raccolta di risorse naturali, dove piccoli gruppi nomadi sopravvivevano grazie alla caccia, alla pesca e alla raccolta di piante selvatiche. Questa era dominata dalla dipendenza diretta dalle risorse naturali disponibili, con pochissime modifiche apportate all'ambiente naturale e senza l'uso di tecnologie significative. Con l'introduzione dell'agricoltura, gli esseri umani entrarono nella fase della "Society 2.0" o "Società Agricola", stabilendosi in luoghi fissi per coltivare la terra e addomesticare gli animali. Questo cambiamento permise lo sviluppo di surplus alimentari che supportarono l'aumento della popolazione e la nascita delle prime città. Questa transizione dall'essere nomadi a insediamenti stabili favorì la stratificazione sociale e la formazione di strutture sociali più complesse. La rivoluzione industriale segnò l'inizio della "Society 3.0", chiamata anche "Società Industriale", una fase in cui la meccanizzazione pesante, alimentata inizialmente dal vapore e successivamente dall'elettricità, trasformò le economie basate sull'agricoltura in economie industriali. Ciò causò una massiccia migrazione dalle aree rurali alle città, trasformando il tessuto urbano e sociale e introducendo nuove classi lavorative e sociali (Narvaez Rojas, Alomia Penafiel, Loaiza Buitrago, & Tavera Romero, 2021). Verso la

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

fine del XX secolo, l'avvento della digitalizzazione e delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione inaugurò la “Society 4.0”, nota anche come “Società dell'Informazione”. Questa fase è stata caratterizzata dall'accesso globale e dalla gestione delle informazioni, con Internet che ha reso le conoscenze e i dati risorse fondamentali, influenzando profondamente lavoro, istruzione e vita quotidiana. Attualmente la “Society 5.0” mira a integrare armoniosamente i progressi tecnologici con le esigenze sociali, seguendo le fondamenta proposte dal paradigma dell’Industria 5.0. Questa "Super-smart Society" utilizza tecnologie avanzate come l'intelligenza artificiale, l'Internet delle Cose e il Big Data per integrare spazi fisici e digitali, affrontando sfide complesse quali l'invecchiamento della popolazione, il declino demografico e le problematiche ambientali (Aquilani, Piccarozzi, Abbate, & Codini, 2020). Society 5.0 aspira a superare la mera automazione industriale, promuovendo una vita qualitativamente migliore e più sostenibile per tutti, garantendo che i vantaggi dell'innovazione tecnologica siano accessibili universalmente, piuttosto che limitati a una ristretta élite (Narvaez Rojas, Alomia Penafiel, Loaiza Buitrago, & Tavera Romero, 2021).

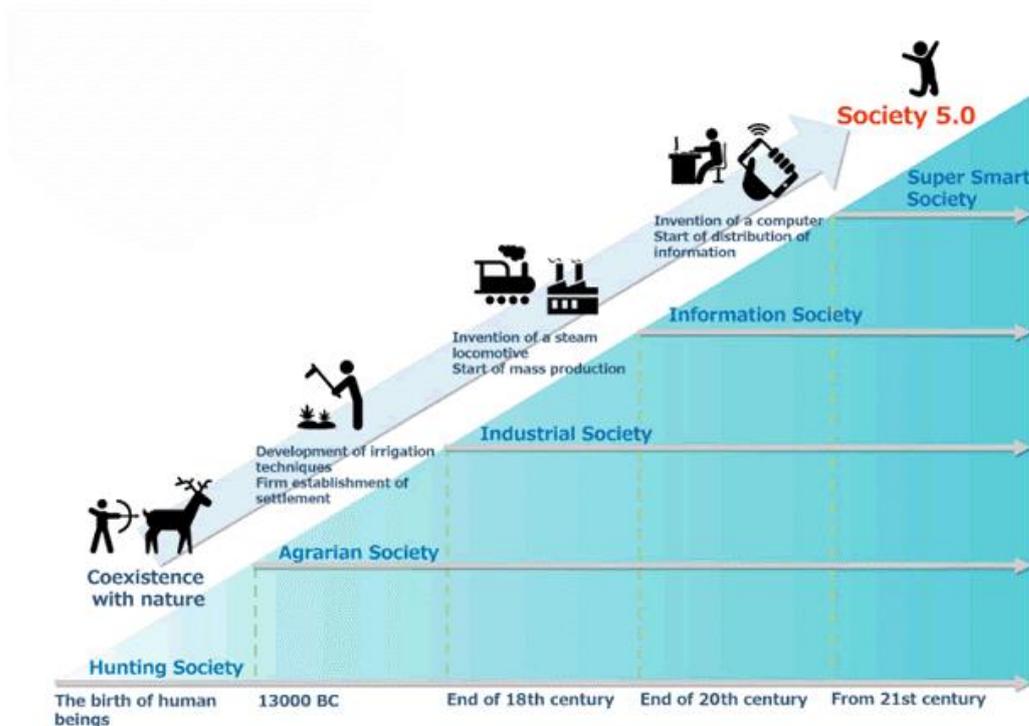


Figura 22: dalla Società 1.0 alla Società 5.0 (Federation, 2016)

Nella realizzazione del concetto di Society 5.0, il superamento di determinate barriere strutturali e concettuali si rivela essenziale per l'efficace integrazione delle tecnologie

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

avanzate nella vita quotidiana e nella gestione delle risorse sociali. Queste barriere, descritte da Keidanren (Federation, 2016) metaforicamente come "i cinque muri", comprendono ostacoli legislativi, tecnologici, umani, politici e sociali, ciascuno dei quali richiede un approccio olistico e integrato per il loro superamento. Di seguito, si esplorano i cinque muri (Figura 22) che la Society 5.0 mira a superare (Narvaez Rojas, Alomia Penafiel, Loaiza Buitrago, & Tavera Romero, 2021):

- 1) Muro delle Politiche e delle Agenzie Governative: La frammentazione e la mancanza di coordinamento tra le varie agenzie governative possono ostacolare l'adozione di tecnologie innovative e la realizzazione di politiche integrate. Superare questo muro significa promuovere una governance integrata e coesa che faciliti la collaborazione inter-agenzia e la formulazione di politiche olistiche che supportano l'innovazione tecnologica e sociale (Federation, 2016).
- 2) Muro del Sistema Legale: Le regolamentazioni obsolete e la lentezza nel rinnovamento delle leggi possono frenare il progresso tecnologico e l'adattamento della società alle nuove realtà digitali. Risulta essenziale modernizzare il quadro legislativo per supportare, piuttosto che limitare, l'innovazione, garantendo al contempo la sicurezza e la protezione dei dati personali e la gestione etica delle nuove tecnologie (Federation, 2016).
- 3) Muro delle Tecnologie: Questo muro si riferisce alla resistenza al cambiamento tecnologico e alla difficoltà nell'adozione di nuove soluzioni tecnologiche. Per superare questo ostacolo, è necessario promuovere la ricerca e lo sviluppo, supportare l'alta formazione nel settore tecnologico e incentivare le partnership tra il settore pubblico, le istituzioni accademiche e le imprese private (Narvaez Rojas, Alomia Penafiel, Loaiza Buitrago, & Tavera Romero, 2021).
- 4) Muro delle Risorse Umane: La mancanza di competenze e di formazione adeguata può limitare l'uso efficace delle tecnologie avanzate. Per abbattere questo muro, è fondamentale investire nell'educazione e nella formazione continua, sviluppando competenze che vanno dall'alfabetizzazione digitale fino a specializzazioni avanzate in campi come l'intelligenza artificiale e l'analisi dei dati (Narvaez Rojas, Alomia Penafiel, Loaiza Buitrago, & Tavera Romero, 2021).
- 5) Muro dell'Accettazione Sociale: La diffidenza e la resistenza al cambiamento da parte della società possono impedire l'adozione e l'implementazione efficace delle innovazioni tecnologiche. Superare questo muro implica lavorare sulla

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

sensibilizzazione e sul coinvolgimento comunitario, mostrando concretamente i benefici delle nuove tecnologie e promuovendo un dialogo costruttivo su come queste possono migliorare la qualità della vita (Federation, 2016).

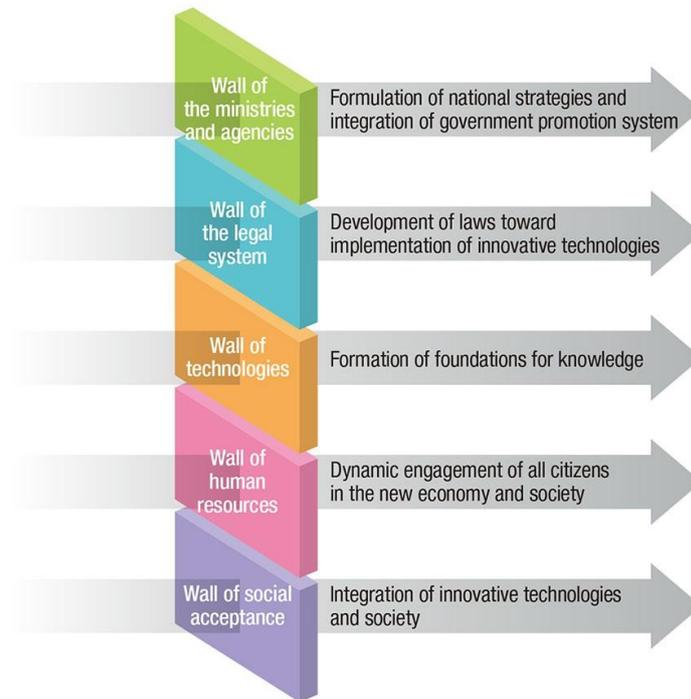


Figura 23: i “cinque muri” della Società 5.0 (Hitachi, 2017)

Si può quindi osservare come sia l'Industria 4.0 che le organizzazioni nel loro complesso costituiscono elementi cruciali per la Società 5.0, ma l'attenzione non è rivolta unicamente al settore industriale: essa abbraccia tutti gli attori coinvolti, inclusi cittadini, governi e istituzioni accademiche. La Società 5.0 e l'Industria 5.0 condividono somiglianze poiché entrambe si riferiscono a una trasformazione radicale della nostra società ed economia, orientandosi verso un nuovo paradigma. È fondamentale che il rispetto per la privacy, l'autonomia, la dignità umana e i diritti universali dei lavoratori siano integrati nei valori europei e nei diritti fondamentali (Breque, De Nul, & Petridis, 2021). Questi principi dovrebbero riflettere l'importanza attribuita alla ricerca e all'innovazione nel supportare l'industria per garantire un servizio duraturo all'umanità, rispettando i limiti planetari. Contrariamente all'Industria 4.0, che è percepita come guidata dalla tecnologia, l'Industria 5.0 è definita dall'essere guidata dai valori. Questa nuova fase non solo complementa ma estende le caratteristiche fondamentali dell'Industria 4.0, essendo le due strettamente

4. Industria 5.0 (Quinta Rivoluzione Industriale)

complementari. Ciò significa che l'Industria 5.0 non sostituisce le tecnologie già implementate, ma piuttosto coesiste con esse, arricchendole (Nahavandi, 2019). Durante i suoi dieci anni di esistenza, l'Industria 4.0 ha focalizzato l'attenzione sulla digitalizzazione e sulle tecnologie basate sull'intelligenza artificiale per migliorare l'efficienza e la flessibilità produttiva. In contrasto, come già evidenziato in precedenza, l'Industria 5.0 enfatizza l'importanza della ricerca e dell'innovazione nel supportare l'industria, nell'intento di fornire un servizio a lungo termine all'umanità, operando sempre entro i confini imposti dalla sostenibilità planetaria (Breque, De Nul, & Petridis, 2021).

5. Diffusione dei paradigmi e delle tecnologie

Dall'analisi condotta emerge come l'Industria 4.0, prima, e l'Industria 5.0, poi, siano state fondamentali per la trasformazione delle industrie in Smart Factories, nelle quali non solo i macchinari sono interconnessi tra loro, ma anche la figura umana ritorna ad essere centrale all'interno dei processi produttivi. All'interno di questo contesto viene inoltre posta particolare enfasi sul concetto di Trasformazione digitale. La trasformazione digitale si riferisce all'adozione delle tecnologie avanzate per trasformare i processi aziendali da non digitali a digitali. Questo include, tra l'altro, lo spostamento dei dati nel cloud, l'uso di dispositivi e strumenti tecnologici per la comunicazione e la collaborazione, nonché l'automazione dei processi.

5.1. Trasformazione digitale

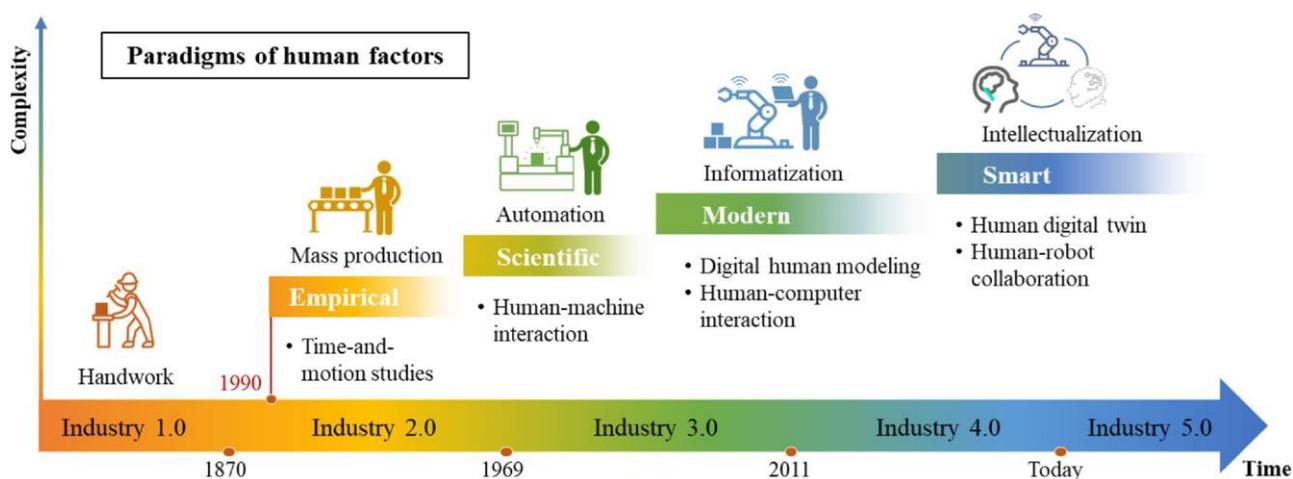


Figura 24: Rivoluzioni Industriali (He, et al., 2024)

L'ultimo decennio ha visto rapidi progressi in tecnologie come l'Internet of things, l'intelligenza artificiale, la robotica, il mobile, il cloud computing, l'analisi dei big data, la produzione additiva (stampa 3D) e la realtà virtuale e aumentata (VR/AR). Queste tecnologie, intrecciate dalla massiccia proliferazione dei big data, generati principalmente dai dispositivi connessi, stanno sfumando i confini tra gli aspetti fisici, digitali e biologici dei sistemi di produzione globali. Le aziende sono ora in grado di sperimentare grandi benefici in termini di riduzione dei costi, miglioramento dell'efficienza, aumento della produttività, personalizzazione di massa e, soprattutto, nuovi modelli di ricavo e di business. Ad esempio, oltre agli oggetti fisici, le aziende ora vendono dati e servizi,

5. Diffusione dei paradigmi e delle tecnologie

mentre tecnologie come l'IoT hanno aggiunto connettività a prodotti precedentemente non connessi (Hoffmann & Mehta, 2024).

Negli ultimi anni, i grandi poli manifatturieri globali in paesi come Germania, Stati Uniti, Cina e Giappone hanno lanciato iniziative per promuovere la trasformazione digitale nei loro processi produttivi.

In Germania, come visto in precedenza, l'Industria 4.0 è stata avviata nel 2013 come uno dei dieci "Progetti Futuri" identificati dal governo tedesco nell'ambito della sua strategia high-tech. Questo programma mira a creare fabbriche intelligenti e centri di innovazione manifatturiera in tutto il paese, segnando un cambiamento di paradigma dalla produzione centralizzata alla produzione intelligente decentralizzata.

Anche la Francia, con il programma "Nuova Francia Industriale" iniziato nel 2013, ha delineato piani per 34 nuovi progetti industriali in una gamma di settori che spaziano dai treni ad alta velocità di nuova generazione agli aerei elettrici, dalle auto autonome ai tessuti intelligenti, fino alle fabbriche del futuro.

Negli Stati Uniti, il National Network for Manufacturing Innovation, noto anche come Manufacturing U.S.A., è stato introdotto nel 2016 e prevede la creazione di 45 centri di innovazione in tutto il paese per sviluppare tecnologie di produzione intelligente. Le aree di interesse includono la produzione additiva nonché la produzione e lo sviluppo di materiali innovativi. Il dipartimento federale ha inizialmente stanziato 1,2 miliardi di dollari per questo programma, con ulteriori 2,4 miliardi di dollari forniti dai partner istituzionali non federali.

In Giappone, il piano di trasformazione sociale denominato "Società 5.0" è stato avviato nel 2016 e si concentra sullo sviluppo di soluzioni nei settori dell'IoT, dell'intelligenza artificiale, dei sistemi cyber-fisici, della produzione additiva, dei veicoli a nuova energia, dei robot, della realtà virtuale e aumentata e dell'analisi dei dati. Nei contesti internazionali, l'Industria 5.0 è destinata a digitalizzare l'intero ecosistema manifatturiero (Hoffmann & Mehta, 2024).

In Figura 25, è possibile osservare le previsioni per quanto riguarda la spesa mondiale per la trasformazione digitale, nel periodo compreso tra il 2017 e 2027: entro il 2027, si stima che la spesa globale per la trasformazione digitale raggiungerà i 3,9 trilioni di dollari, a

5. Diffusione dei paradigmi e delle tecnologie

dimostrazione dell'importanza di questo fenomeno nel contesto industriale (Statista, 2024).

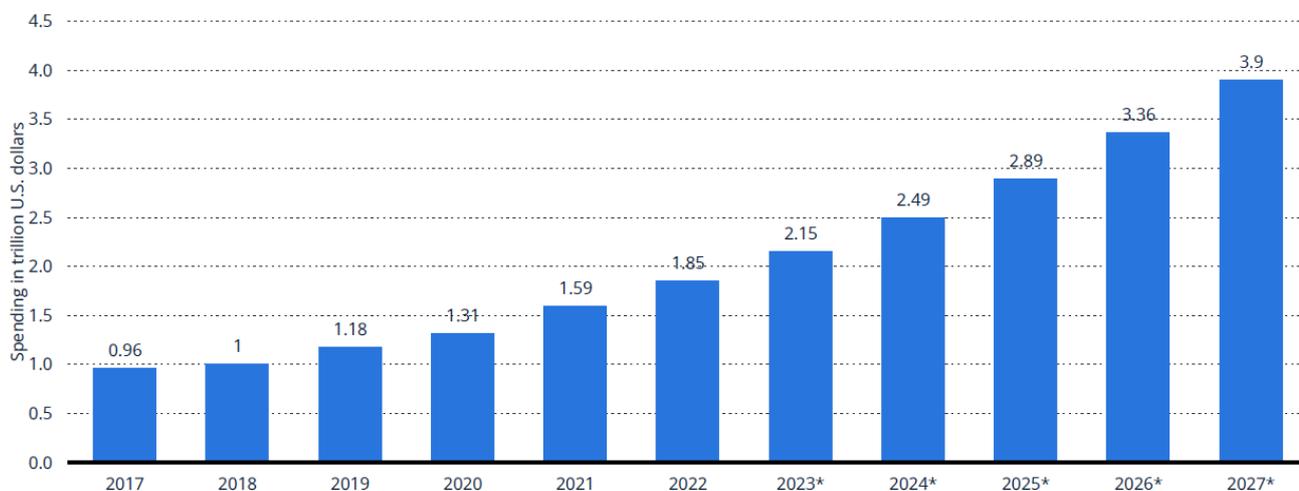


Figura 25: Spesa mondiale per la trasformazione digitale 2017-2027 (Statista, 2024)

Le tecnologie emergenti principalmente adottate sono riportate nel grafico in Figura 26, con il relativo tasso di adozione: lo studio è stato condotto tra Giugno e Settembre 2023, con un totale di 2104 rispondenti, aziende leaders mondiali, in 86 paesi.

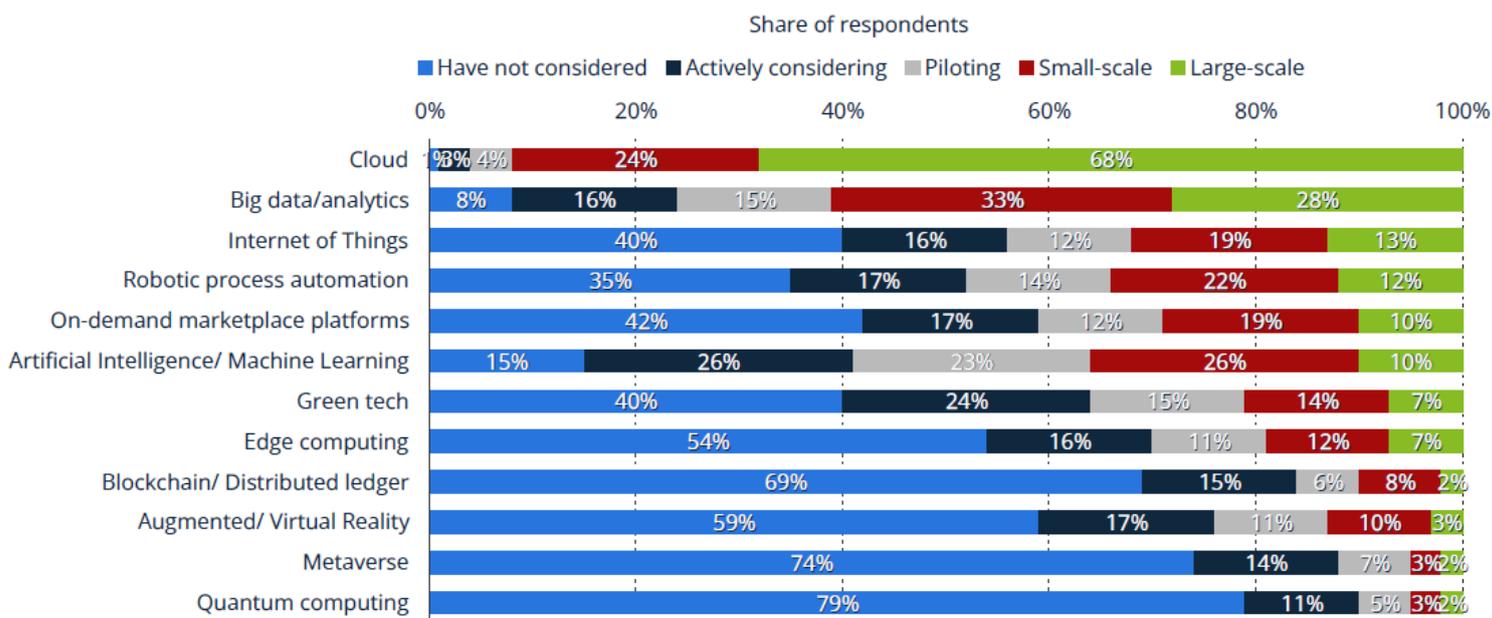


Figura 26: Tasso di adozione delle tecnologie emergenti a livello mondiale (Statista, Digital transformation, 2024)

5. Diffusione dei paradigmi e delle tecnologie

Come detto in precedenza, l'Unione Europea è particolarmente motivata nel tracciare una linea guida verso la trasformazione digitale degli stati membri, attraverso il programma "Digital Decade". Il "Digital Decade" è un'iniziativa strategica delineata dall'Unione Europea con l'obiettivo di trasformare digitalmente l'Europa entro il 2030. Questa strategia, espressa attraverso il programma "2030 Digital Compass" (Figura 27), mira a posizionare l'UE come leader globale nell'era digitale. Il programma è strutturato intorno a quattro pilastri principali: competenze digitali degli individui, digitalizzazione delle imprese, infrastrutture digitali sicure e digitalizzazione dei servizi pubblici. Per quanto riguarda le competenze digitali, uno degli obiettivi principali è quello di aumentare significativamente il numero di specialisti ICT con una particolare attenzione alla riduzione del divario di genere in questo settore. Si prevede che entro il 2030, almeno l'80% della popolazione dell'UE possieda competenze digitali di base, garantendo così una forza lavoro adeguatamente preparata per le sfide future. Inoltre, il programma punta a garantire che il 75% delle aziende europee adotti tecnologie avanzate come il cloud computing, l'intelligenza artificiale e i big data. Un altro obiettivo del programma è la digitalizzazione dei servizi pubblici. Entro il 2030, tutti i principali servizi pubblici dovrebbero essere disponibili online, facilitando l'accesso ai cittadini e migliorando l'efficienza amministrativa. Inoltre, tutti i cittadini dell'UE dovrebbero avere accesso ai propri dossier medici e a un'identità digitale sicura, promuovendo così una maggiore inclusione digitale e migliorando la qualità della vita (Commission, 2024).

5. Diffusione dei paradigmi e delle tecnologie

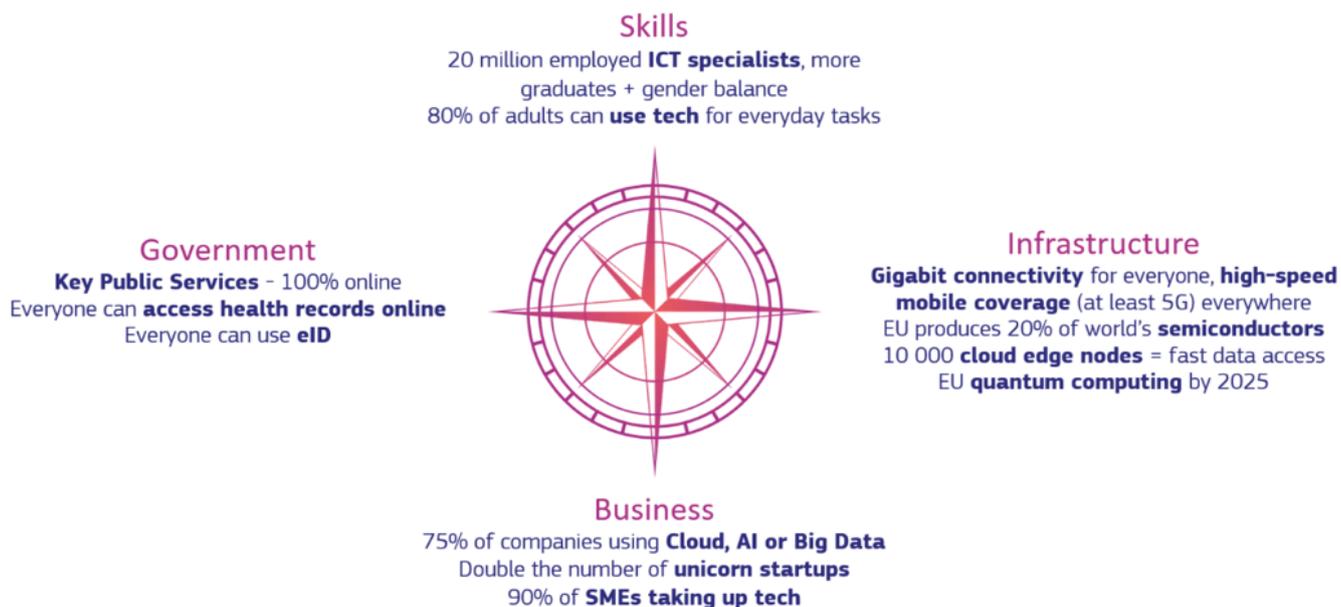


Figura 27: Digital Compass 2030 (Sapuppo, 2024)

Per poter monitorare e garantire il raggiungimento di questi obiettivi, la Commissione Europea ha introdotto nel 2014 l'indice DESI. Il Digital Economy and Society Index viene utilizzato per confrontare e valutare il livello di digitalizzazione degli stati membri ed è composto da quattro dimensioni (Commission, Digital Economy and Society Index (DESI) 2022, 2022):

- **Capitale umano:** Misura le competenze digitali di base e avanzate della popolazione. Questa dimensione considera sia il livello di alfabetizzazione digitale tra i cittadini sia il numero di specialisti ICT presenti nel mercato del lavoro;
- **Connettività:** Valuta la diffusione e la qualità delle infrastrutture di banda larga. Include la disponibilità e l'adozione di reti a banda larga fisse e mobili, nonché la velocità e la qualità delle connessioni;
- **Integrazione delle tecnologie digitali:** Esamina l'adozione delle tecnologie digitali da parte delle imprese;
- **Servizi pubblici digitali:** Valuta l'offerta e l'uso dei servizi pubblici digitali, come l'e-government e l'e-health. Include la disponibilità di servizi pubblici online e l'accesso ai dossier medici elettronici.

Inoltre, le quattro dimensioni sopra citate sono l'insieme di diversi indicatori utili al raggiungimento degli obiettivi europei, come è possibile vedere in Figura 28.

5. Diffusione dei paradigmi e delle tecnologie

DESI Dimension	Indicators related to the Path to the Digital Decade proposal
1 Human capital	At least basic digital skills ICT specialists Female ICT specialists
2 Connectivity	Gigabit for everyone (Fixed very high capacity network coverage) 5G coverage
3 Integration of digital technology	SMEs with a basic level of digital intensity AI Cloud Big data
4 Digital public services	Digital public services for citizens Digital public services for businesses

Figura 28: dimensioni e indicatori DESI (Commission, Digital Economy and Society Index (DESI) 2022, 2022)

In Figura 29, viene riportato il DESI 2022: Finlandia, Danimarca, Paesi Bassi e Svezia rappresentano le economie digitali più avanzate nell'UE, seguite da Irlanda, Malta e Spagna. Romania, Bulgaria e Grecia hanno i punteggi DESI più bassi. Nel DESI 2022 l'Italia si colloca al diciottesimo posto su ventisette Stati membri dell'Ue. Negli ultimi 5 anni (2017-2022) il punteggio dell'Italia è passato da 28,2 a 49,3 registrando il progresso più consistente tra tutti i paesi UE, sebbene resti inferiore alla media europea (52,3) e a paesi come Spagna (60,8), Francia (53,3) e Germania (52,9) (Assolombarda, 2024).

5. Diffusione dei paradigmi e delle tecnologie

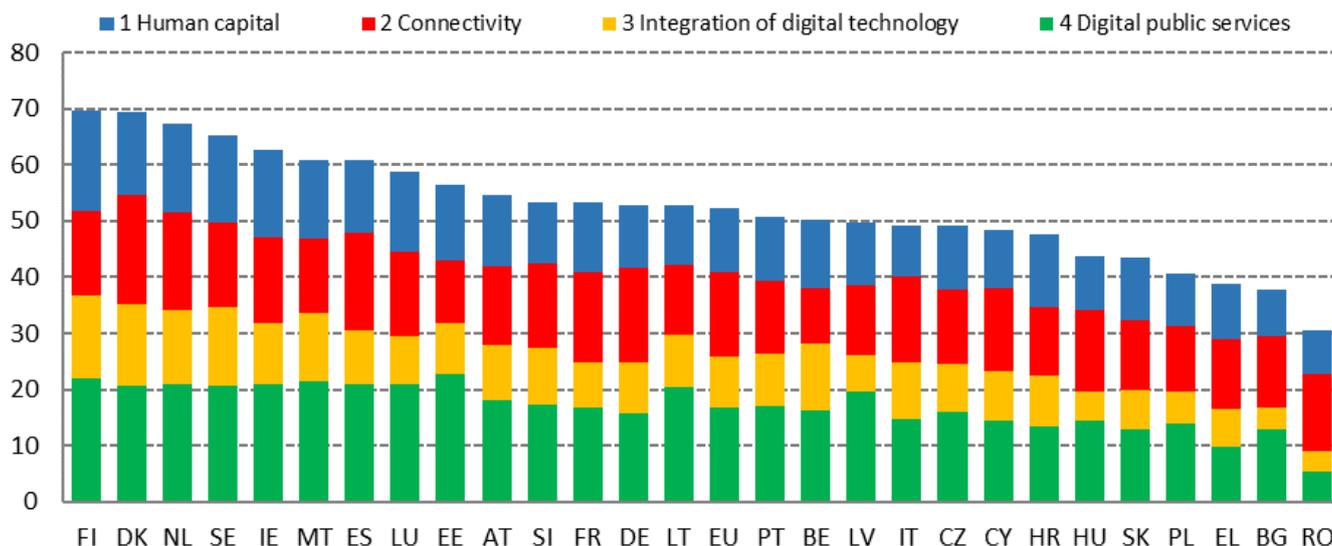


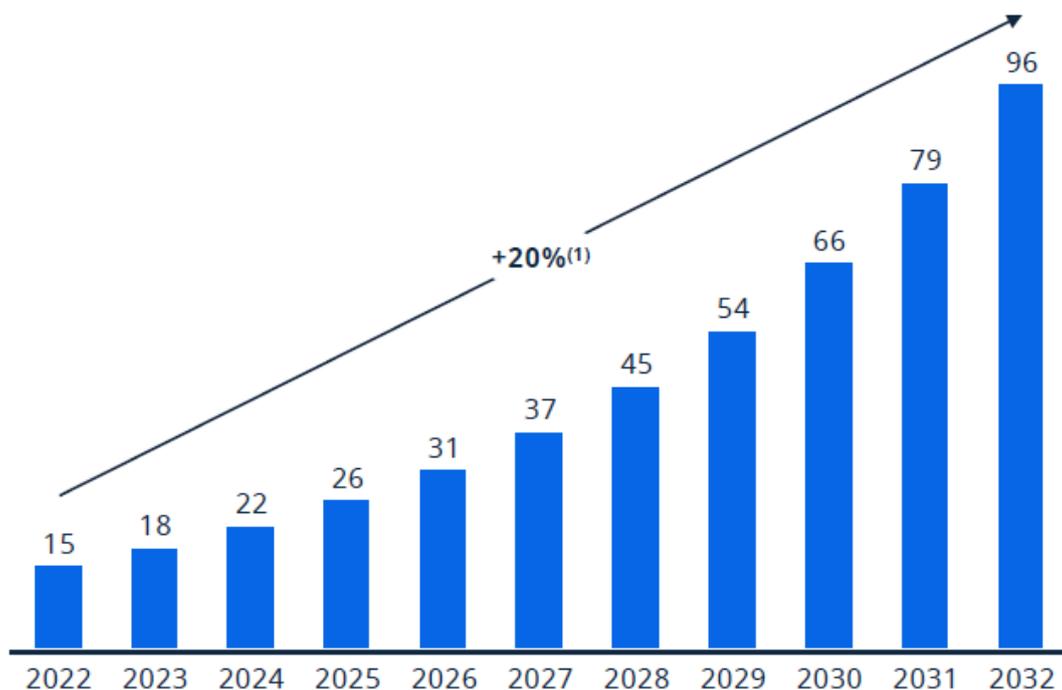
Figura 29: Digital Economy and Society Index, 2022 (Commission, Digital Economy and Society Index (DESI) 2022, 2022)

A partire dal 2023, in linea con il Programma Politico del “Digital Decade”, il DESI è ora integrato nel rapporto sull’andamento complessivo dell’iniziativa e viene utilizzato per monitorare i progressi verso gli obiettivi digitali, per questo motivo è stato riportato l’ultimo indice DESI disponibile.

5.2. Additive Manufacturing

Una delle tecnologie in grado di rendere le Smart Factories una realtà è l’additive manufacturing. Questa tecnologia permette, come visto nei precedenti capitoli, di convertire un modello digitale di un oggetto in un oggetto fisico tridimensionale aggiungendo materiali stampabili “strato per strato”. In particolare, la stampa 3D è in grado di: creare schemi geometrici complessi che non sono possibili con i metodi di produzione tradizionali, progettare e realizzare componenti più leggeri e controllare varie proprietà dei materiali come densità e rigidità. L’AM ha anche guadagnato rapidamente popolarità, poiché comporta meno costruzione di prototipi, meno stampi e meno lavorazioni successive (Hoffmann & Mehta, 2024).

5. Diffusione dei paradigmi e delle tecnologie



*Figura 30: Mercato globale dell'Additive Manufacturing in miliardi di dollari (Hoffmann & Mehta, 2024) *(1) CAGR: Tasso medio di crescita nel tempo*

General Electric, una società statunitense che opera nel settore della produzione di motori e di macchine elettriche, è particolarmente attiva nell'introdurre la stampa 3D all'interno dei propri processi industriali: ha investito oltre 3 miliardi di dollari in tecnologie di stampa 3D e le utilizza in molte delle sue attività, tra cui motori a reazione, dispositivi medici e parti di elettrodomestici. Un esempio del suo utilizzo è il motore a reazione GENx, che è stato prodotto utilizzando una tecnica avanzata chiamata "direct metal laser melting". L'azienda ha anche lanciato una nuova unità di business chiamata GE Additive e ha acquisito partecipazioni di maggioranza in diverse aziende di stampa 3D, quali Concept Laser, Arcam e Cobod International. Nel 2022, la sede di GE Aviation a Singapore è diventata il primo sito di manutenzione, riparazione e operazioni (MRO) approvato per l'uso della produzione additiva di metalli per riparare componenti di motori a reazione commerciali ed è stata in grado di dimezzare i tempi di riparazione (Hoffmann & Mehta, 2024).

5.3. Intelligenza artificiale e robotica

Fondamentale all'interno del recente panorama industriale è l'utilizzo di robot autonomi e dell'intelligenza artificiale, che in collaborazione con gli addetti umani permettono alle aziende di ottenere efficienza e qualità superiori con costi ridotti. Ad esempio, uno studio condotto dal Massachusetts Institute of Technology nel 2016, ha rilevato che le squadre composte da esseri umani e robot che lavorano in sinergia possono essere l'85% più produttive rispetto alle squadre composte solo da esseri umani o solo da robot. Questi aspetti sono risultati fondamentali durante la pandemia COVID-19: attraverso la collaborazione uomo-robot, le industrie riescono a creare supply chain maggiormente resilienti e in grado di non interrompere la produzione (Hoffmann & Mehta, 2024).

Il grafico riportato in Figura 31 mostra le previsioni di crescita per il mercato globale dei robot industriali nel decennio 2018-2028: nel 2020, dove è possibile osservare il punto più basso della curva a causa della pandemia COVID-19, la dimensione del mercato è stata stimata intorno ai 55 miliardi di dollari, con circa 2,7 milioni di unità di robot industriali in funzione in tutto il mondo. Nel 2028, si prevede che la dimensione del mercato supererà i 165 miliardi di dollari (Statista, Smart factories , 2019).

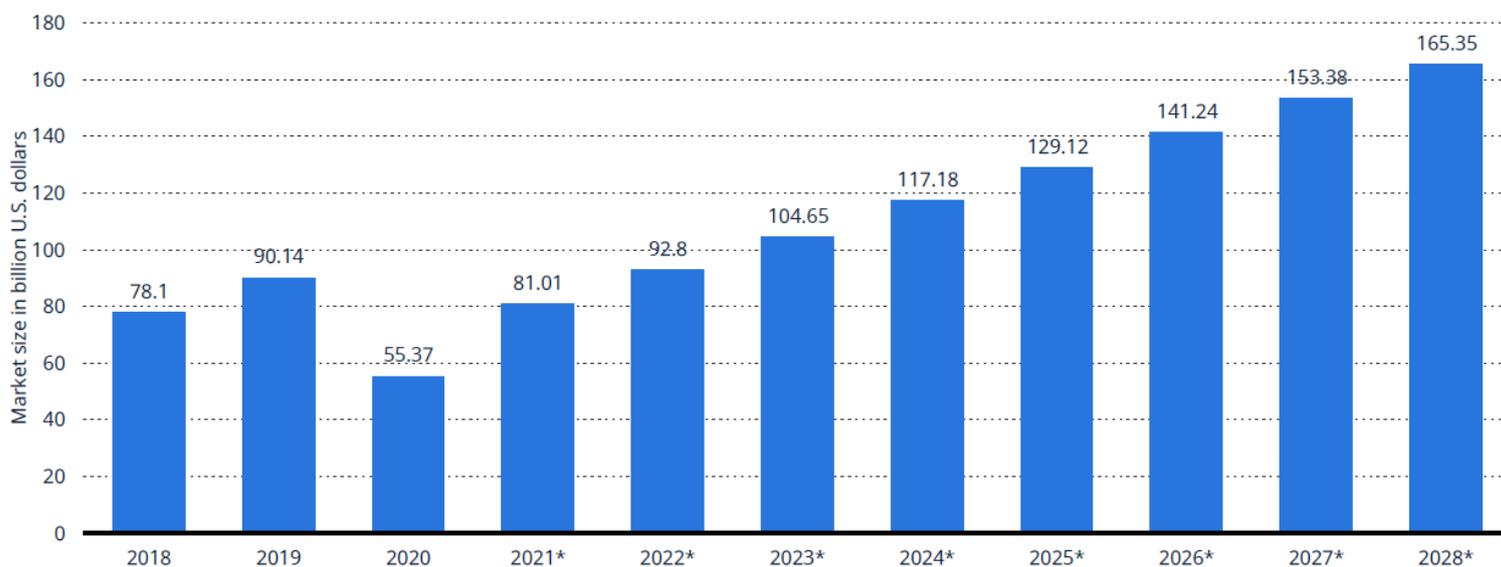


Figura 31: Dimensione del mercato globale della robotica industriale 2018-2028 (Statista, Smart factories , 2019)

5. Diffusione dei paradigmi e delle tecnologie

La capacità di autoapprendimento dei robot e lo sviluppo dell'intelligenza artificiale occupano quindi un ruolo cruciale nelle fabbriche intelligenti in vari settori industriali. Un esempio di tali applicazioni è rappresentato dalla produzione autonoma, in cui i robot sono in grado di riconoscere attrezzature e parti, determinando autonomamente come utilizzarle senza alcun intervento umano. Inoltre, i sistemi di IA utilizzano il riconoscimento di schemi per applicare le migliori pratiche nella gestione degli errori. Ad esempio, un'applicazione di IA può individuare un difetto in un componente aeronautico durante la produzione e caricare questi dati in un sistema cloud, consentendo così la rimozione delle parti difettose e generando risparmi significativi in termini di riparazioni. Nell'ambito della produzione industriale, i robot sono impiegati anche per attività che potrebbero essere particolarmente complesse e pericolose per un essere umano.

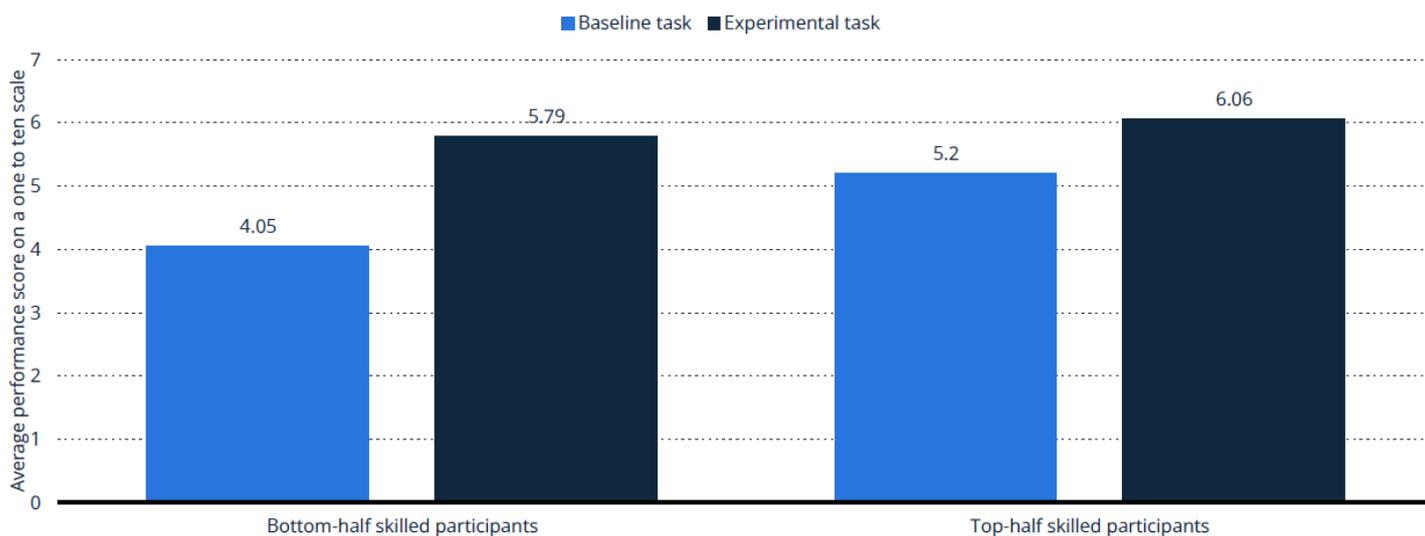


Figura 32: *Impatto dell'IA sulle prestazioni dei lavoratori nel 2023, per livello di competenza (Statista, Digital transformation, 2024)*

Il grafico riportato in Figura 32 mostra i risultati ottenuti da uno studio condotto nel 2023 dalle università di Stanford e Harvard (Statista, 2024): l'intelligenza artificiale ha dimostrato di migliorare le prestazioni lavorative sia per i lavoratori meno qualificati che per quelli più qualificati, con un aumento significativo per quanto riguarda i lavoratori meno qualificati.

5. Diffusione dei paradigmi e delle tecnologie

Anche il mercato dell'intelligenza artificiale è destinato ad aumentare nei prossimi anni, risultando fondamentale per la trasformazione digitale delle industrie e della società (Figura 33), e generando con la propria implementazione un notevole aumento dei ricavi per le aziende (Figura 34).

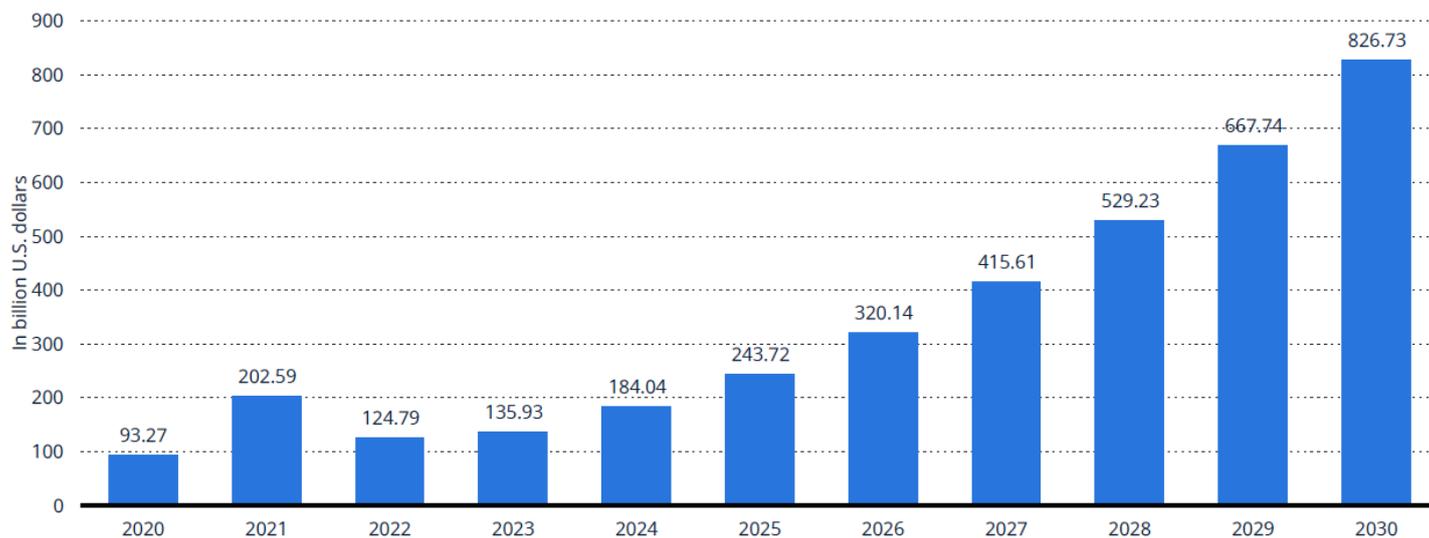


Figura 33: Mercato dell'IA nel mondo dal 2020 al 2030, in miliardi di dollari (Statista, 2024)

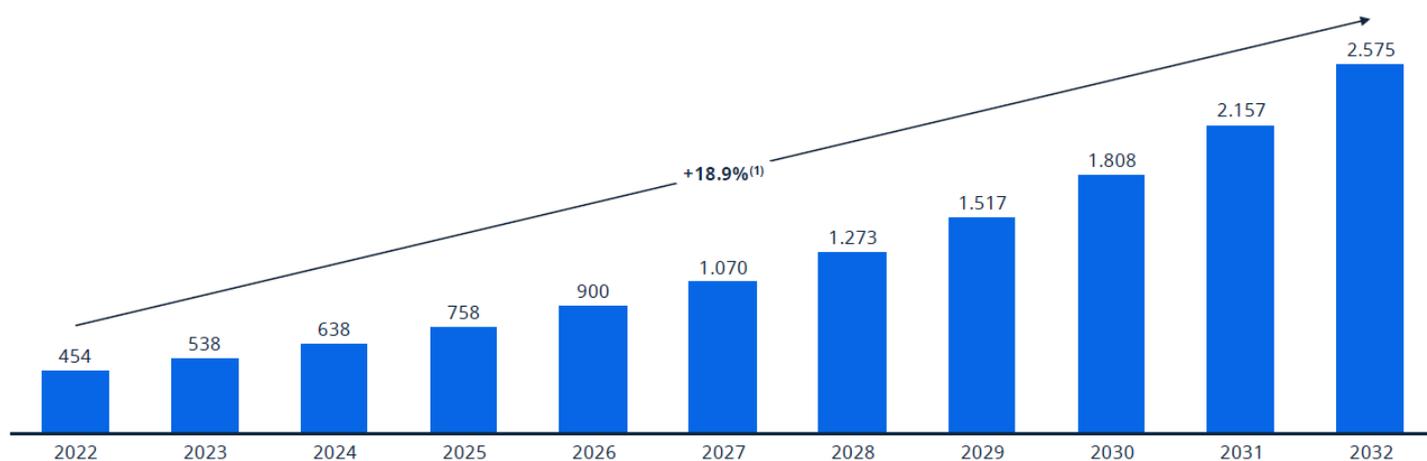


Figura 34: Proiezione dei ricavi globali dell'IA in miliardi di dollari (Hoffmann & Mehta, 2024)

5.4. Internet of things

L'IoT rappresenta la tecnologia più impattante all'interno dei due paradigmi industriali, essendo in grado di connettere tra loro tutti i dispositivi e i macchinari presenti all'interno dell'ecosistema industriale. L'Internet of Things, come visto, è una tecnologia che si basa sull'utilizzo di sensori, in grado di raccogliere e trasmettere dati in maniera continuativa. La recente diminuzione dei loro prezzi, l'aumento della potenza di calcolo, i progressi nella connettività dei dati nel cloud e la comunicazione machine-to-machine hanno incentivato il loro utilizzo nelle fabbriche intelligenti: si prevede una notevole crescita di richiesta di sensori, come è possibile vedere in Figura 35, con la possibilità da parte del mercato di raggiungere un valore superiore ai 420 miliardi di dollari entro il 2030 (Statista, Smart factories , 2019).

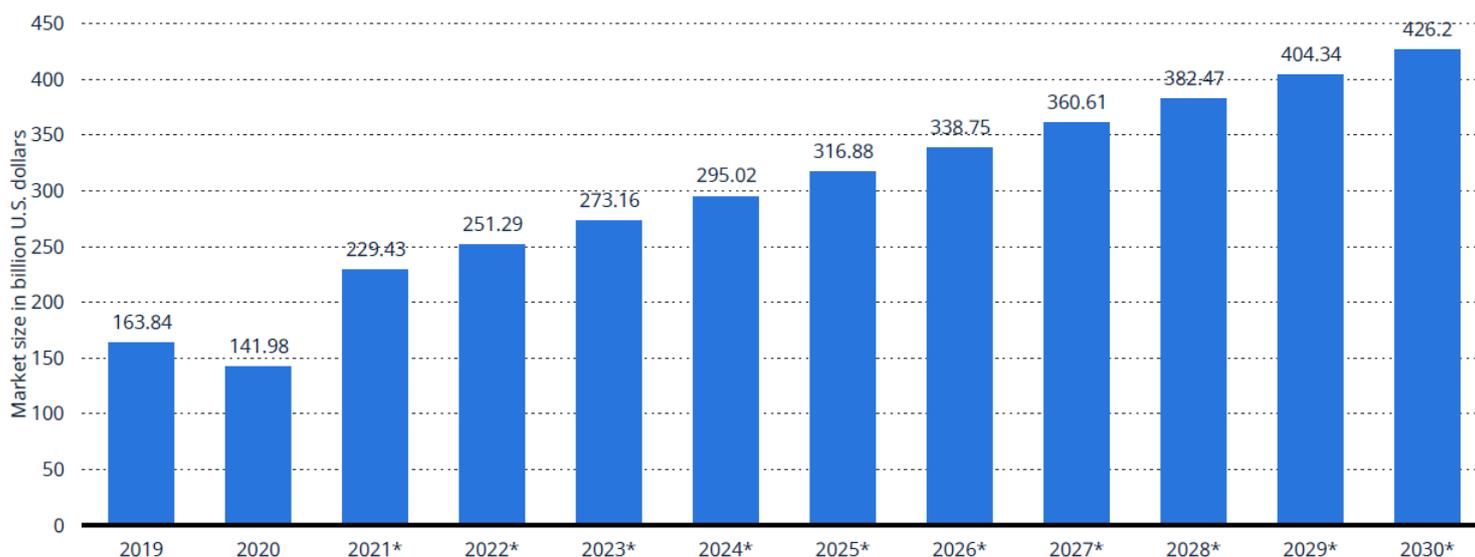


Figura 35: Mercato dei sensori a livello globale (Statista, Smart factories , 2019)

I sensori installati sulle apparecchiature forniscono informazioni accurate e tempestive sulle funzioni di ogni macchina, permettendo di prevedere guasti o errori nella catena di produzione. All'interno dei processi, i sistemi IoT trovano applicazione in tre ambiti principali. In primo luogo, il controllo intelligente dell'impresa: l'IoT consente di collegare macchine intelligenti e componenti di produzione connessi a un sistema informatico centrale, determinando una produzione più efficiente e ottenendo costi ridotti. Tuttavia, poiché questo processo richiede una revisione completa dei sistemi IT e

5. Diffusione dei paradigmi e delle tecnologie

delle tecnologie operative, si prevede che la sua implementazione su larga scala avverrà solo nel medio-lungo termine, in particolare per le imprese medio-piccole. In secondo luogo, la gestione delle prestazioni degli asset: sensori wireless, connettività cloud e analisi dei dati permettono un flusso di informazioni in tempo reale più efficiente sul funzionamento delle macchine connesse, consentendo previsioni accurate dei guasti delle macchine e facilitando la manutenzione predittiva. Infine, il ruolo degli operatori: nonostante i timori sulla possibilità che le macchine possano rendere gli esseri umani superflui nelle Smart Factories, si prevede che i futuri dipendenti utilizzeranno le tecnologie IoT per assumere ruoli specializzati, rendendo così gli impianti di produzione più centrati sull'utente (Hoffmann & Mehta, 2024).

Il numero di dispositivi IoT è destinato ad aumentare notevolmente in futuro, grazie ai diversi benefici portati da questa tecnologia: si prevede che i dispositivi IoT connessi a livello globale saranno quasi 39 miliardi (Figura 36). Tutto questo si traduce in ricavi per le aziende che riusciranno a sfruttare al meglio la trasformazione digitale (Figura 37).

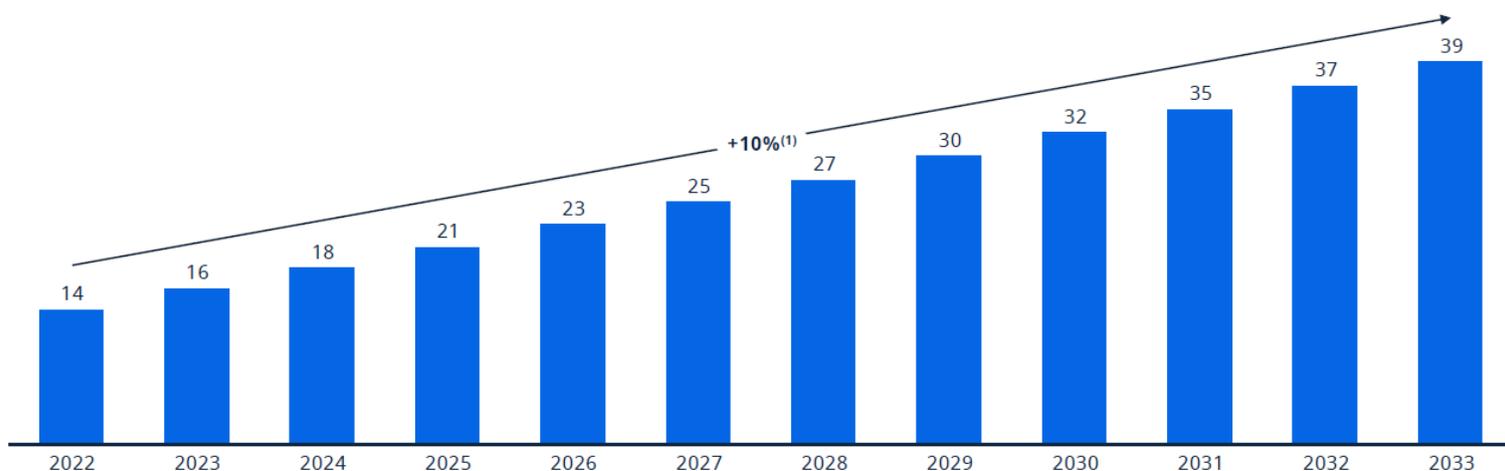


Figura 36: Dispositivi IoT connessi a livello globale in miliardi di unità (Hoffmann & Mehta, 2024) *(1) CAGR: Tasso medio di crescita nel tempo

5. Diffusione dei paradigmi e delle tecnologie

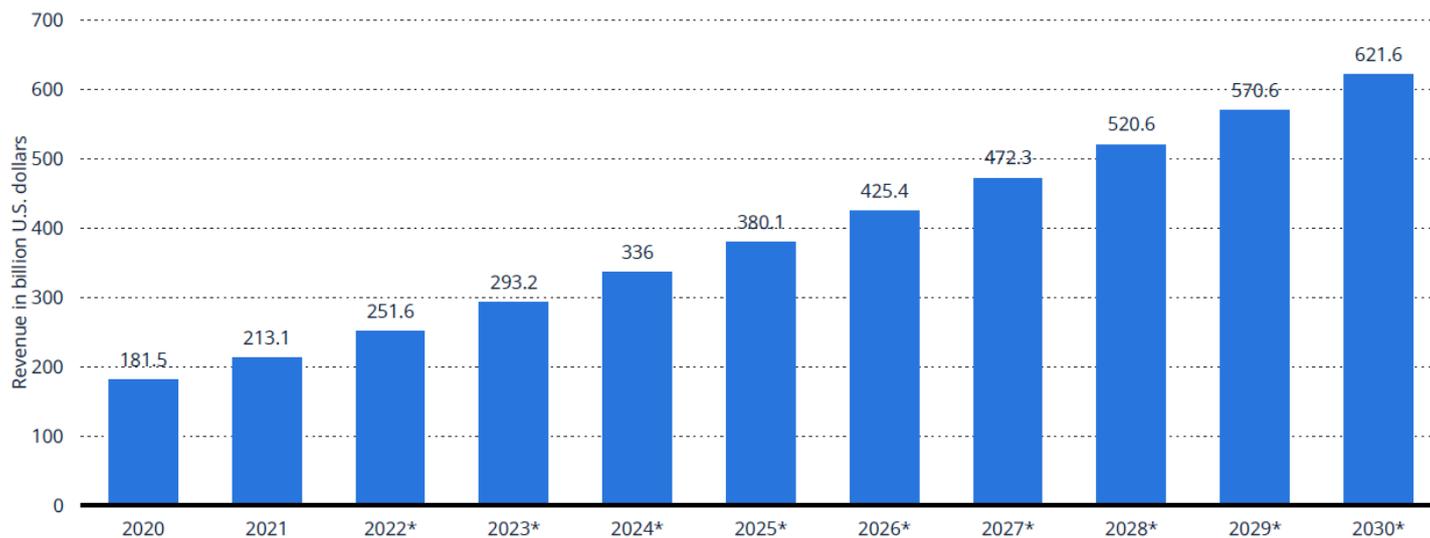


Figura 37: Ricavi annuali totali dell'IoT a livello mondiale in miliardi di dollari (Statista, Internet of Things (IoT), 2024)

5.5. Virtual ed Augmented Reality

Tra le più recenti tecnologie in grado di trasformare le aziende in Smart Factories vi sono la Virtual Reality e l'Augmented Reality. La realtà virtuale (VR) rappresenta una simulazione computerizzata di un ambiente reale, che consente all'utente di sperimentare una situazione specifica in prima persona. Analogamente, la realtà aumentata (AR) è una simulazione computerizzata che incorpora dettagli virtuali all'interno dell'ambiente reale per creare un'esperienza più interattiva per l'utente. Sebbene l'applicazione dell'AR e della VR nel settore manifatturiero industriale sia ancora agli inizi, i loro utilizzi coprono una vasta gamma di operazioni, che spaziano dalla fase pre-manifatturiera alla produzione centrale, fino ai processi di supporto quali manutenzione e formazione. Attualmente, questi sistemi possono essere impiegati per selezionare parti di attrezzature in un magazzino, ricevere istruzioni di riparazione su dispositivi mobili, fornire formazione ai tecnici, controllare la qualità, gestire il rischio e la sicurezza dei lavoratori e supportare la logistica. Secondo un sondaggio condotto da PwC tra i produttori statunitensi, mentre nel 2018 il 33% degli intervistati faceva uso di AR/VR, si prevede che tale percentuale aumenterà al 50% entro il 2025 (Hoffmann & Mehta, 2024).

In Figura 38 viene riportata la spesa a livello mondiale per le tecnologie VR e AR in diversi campi applicativi, nel 2024.

5. Diffusione dei paradigmi e delle tecnologie



Figura 38: Investimenti AR e VR a livello mondiale in miliardi di dollari (Hoffmann & Mehta, 2024)

Come detto, queste tecnologie vengono applicate in diversi campi industriali: nel controllo qualità, ad esempio, aziende come Porsche hanno già iniziato a utilizzare dispositivi VR o AR. Durante l'ispezione delle parti dei veicoli, i lavoratori possono scattare foto e confrontarle con le immagini fornite dai fornitori dell'azienda tramite una sovrapposizione AR, per individuare rapidamente e con precisione dove si trova il problema. In particolare, le tecnologie sopra citate risultano essere efficienti per la formazione del personale: con le industrie globali attualmente alle prese con una carenza di manodopera le tecnologie AR/VR hanno il potenziale per riuscire a formare gli addetti senza esporli a situazioni di pericolo, per evitare anche costi superiori per le aziende. Possono consentire ai nuovi dipendenti di ricevere una formazione più mirata e pertinente mentre sono al lavoro, sotto forma di suggerimenti di formazione. Un esempio di ciò è Honeywell, che ha introdotto uno strumento di simulazione basato su cloud che utilizza sia l'AR che la VR per formare i lavoratori nei suoi impianti di produzione. Un'ulteriore applicazione di queste tecnologie è all'interno della fase di design del prodotto: AR e VR possono aiutare i progettisti ad esaminare il design e il funzionamento di un prodotto prima della sua realizzazione o prima di apportare modifiche. Prima della produzione, l'AR può anche essere utilizzata per confrontare i disegni reali con le loro versioni digitali, al fine di identificare discrepanze e ridurre le spese inutili (Hoffmann & Mehta, 2024). Questa tipologia di tecnologia è destinata ad essere fondamentale all'interno del contesto produttivo, come è possibile vedere nel grafico in Figura 39: si prevede che il mercato

5. Diffusione dei paradigmi e delle tecnologie

delle tecnologie AR e VR cresca fino a raggiungere un valore complessivo di 58 miliardi di dollari.

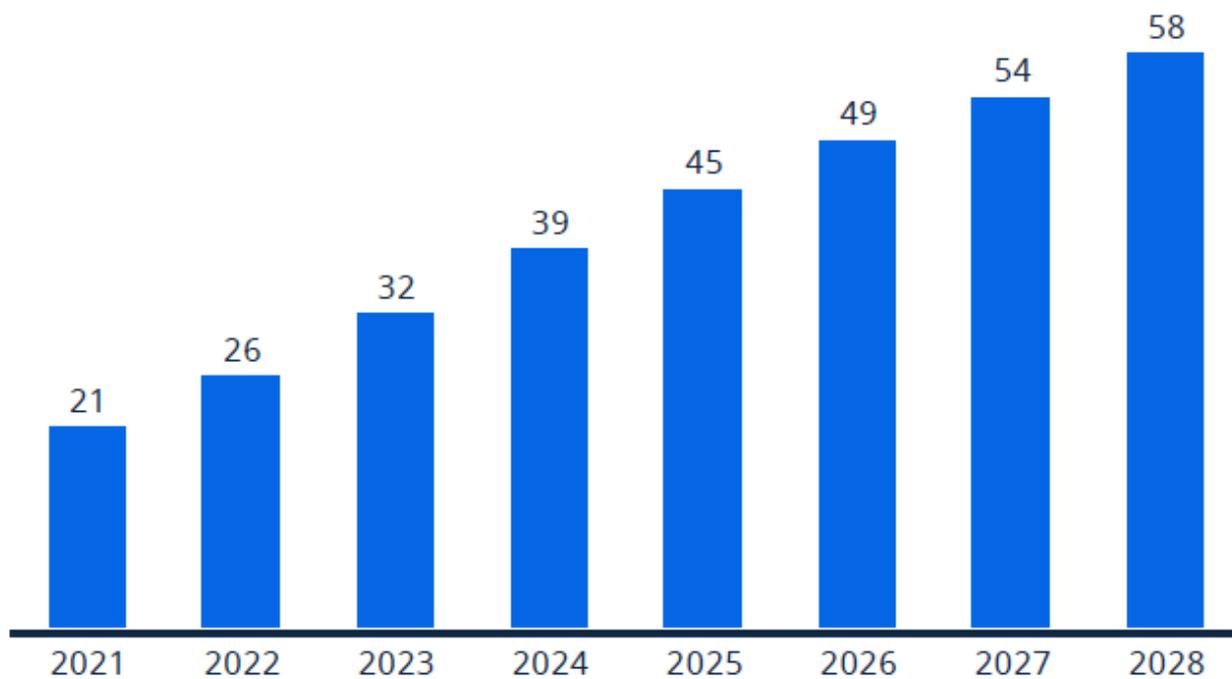


Figura 39: Mercato AR e VR a livello globale dal 2021 al 2028, in miliardi di dollari (Hoffmann & Mehta, 2024)

6. Industria 4.0 vs Industria 5.0: il concetto di Qualità all'interno dei due paradigmi

6.1. Evoluzione del concetto di Qualità

La comprensione del concetto di Qualità e delle modalità per migliorare la qualità si è sviluppata enormemente nel corso dell'ultimo secolo. Nei primi anni del XX secolo, molte aziende in Europa e negli Stati Uniti hanno istituito dipartimenti di qualità dedicati, situati spesso come ultima attività prima della spedizione. Questi dipartimenti erano composti da specialisti e implementavano procedure di ispezione avanzate. Tuttavia, l'identificazione dei difetti in questa fase tardiva comportava la necessità di rifacimenti e costi aggiuntivi. Durante gli anni '60 e '70, l'attenzione si è spostata dal controllo della qualità all'assicurazione della qualità. Il Giappone, nel periodo post-bellico, adottò un approccio opposto per ragioni economiche: tutti gli operatori dovevano essere responsabili della verifica dei componenti ricevuti e del risultato del proprio lavoro. Questo metodo permetteva di rilevare e correggere i problemi il prima possibile, portando allo sviluppo dell'approccio della Gestione Totale della Qualità (TQM) (Gunasekaran, Subramanian, & Ngai, 2019). Negli ultimi vent'anni, l'attenzione si è spostata sull'utilizzo delle nuove tecnologie in ambito qualità. Questo ha comportato l'adozione delle tecnologie e dei metodi dell'Industria 4.0 per il miglioramento della qualità, un approccio noto come Qualità 4.0. L'utilizzo di sensori, Big Data, Machine Learning e altre tecnologie consente il rilevamento e l'analisi automatizzati della qualità, fornendo priorità per il miglioramento dei processi e dei prodotti. La Qualità 5.0 integra ulteriormente queste tecnologie avanzate con un approccio centrato sull'uomo, enfatizzando la collaborazione tra macchine e operatori umani per migliorare l'efficienza produttiva e la qualità della vita. La Qualità 5.0 rappresenta un cambio di paradigma significativo, passando da un modello reattivo a uno proattivo nella gestione della qualità, con un focus su sostenibilità, soddisfazione del cliente, coinvolgimento dei dipendenti e responsabilità sociale (Frick & Grudowski, 2023). Nei paragrafi successivi verranno descritte più nel dettaglio le caratteristiche dei concetti di Qualità 4.0 e 5.0, all'interno di questo paragrafo si cercherà di fornire una panoramica dell'evoluzione della Qualità.

The development of the Quality Concept

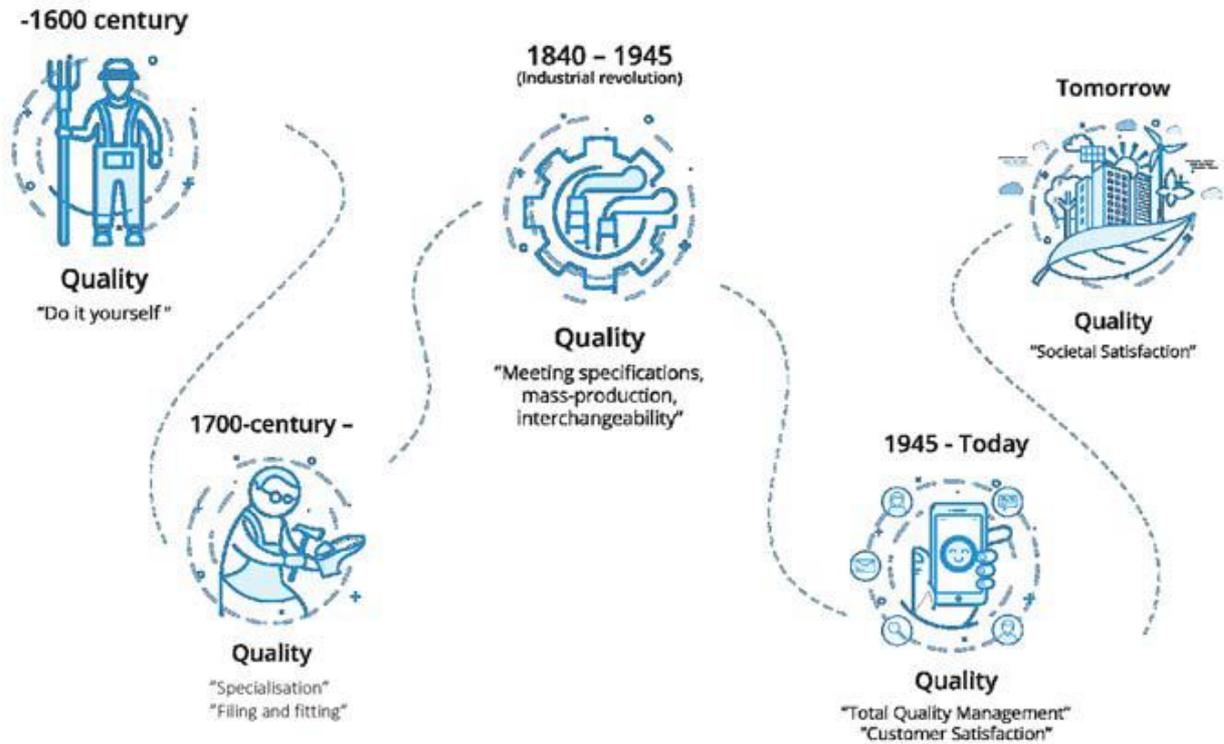


Figura 40: Lo sviluppo del concetto di qualità attraverso cinque generazioni di qualità (Deleryd & Fundin, 2020)

Il concetto di Qualità, più in generale, si riferisce alle caratteristiche e agli attributi, di un prodotto o servizio, che determinano la capacità di soddisfare le esigenze e le aspettative dei clienti. Storicamente, la Qualità è stata interpretata in modi diversi a seconda del contesto culturale, economico e tecnologico. Il percorso evolutivo del concetto di qualità si può suddividere in diverse fasi, ognuna delle quali ha portato a un cambiamento significativo nell'approccio e nella gestione della qualità.

All'interno della prima fase, denominata Qualità 1.0, il concetto di qualità era principalmente associato alla maestria artigianale, all'uso di materiali di alta qualità e alla funzionalità dei prodotti. Un prodotto di alta qualità era tipicamente realizzato con abilità eccezionale, utilizzando materiali pregiati e capace di svolgere la sua funzione in modo affidabile e duraturo. In questo periodo, la qualità era meno standardizzata e più soggettiva, variando considerevolmente in base alle percezioni culturali e geografiche (Frick & Grudowski, 2023). La Qualità 1.0 emerse con le prime industrie e si caratterizzava per l'enfasi sulla quantità di pezzi prodotti piuttosto che sulla qualità di

6. Industria 4.0 vs Industria 5.0: il concetto di Qualità all'interno dei due paradigmi

ciascun output. In questo periodo, la qualità era garantita attraverso l'ispezione e la misurazione di ogni singolo pezzo prodotto, senza particolare attenzione alla riduzione dei costi, all'eliminazione degli sprechi o alla riduzione delle inefficienze. Le ispezioni erano superficiali e mirate principalmente al controllo del prodotto finale, senza intervenire sui processi produttivi per migliorare l'efficienza. Inoltre, le condizioni di lavoro dei lavoratori erano spesso trascurate, con la produttività che prevaleva su ogni altra considerazione (QualitiAmo, 2024).

Con l'avvento della Rivoluzione Industriale, la produzione di massa ha portato alla necessità di uniformità e consistenza nei prodotti. La Qualità 2.0 ha introdotto i processi di controllo della qualità nelle fabbriche, concentrandosi sulla rilevazione e l'eliminazione dei difetti. Durante questo periodo, un prodotto di qualità era uno che soddisfaceva standard definiti, presentava pochi difetti ed era replicato in modo affidabile su larga scala. Questo periodo ha segnato l'inizio di un approccio più sistematizzato e standardizzato alla qualità (Frick & Grudowski, 2023). Con la Seconda Rivoluzione Industriale, si verificarono cambiamenti tecnologici e sociali che influirono profondamente sull'organizzazione del lavoro. Un cambiamento significativo fu l'introduzione del lavoro di squadra, con il quale un prodotto non veniva più realizzato interamente da un singolo lavoratore, ma da un gruppo di persone. L'introduzione delle macchine rese il lavoro più preciso, sicuro e produttivo. La Qualità 2.0 continuava a basarsi sull'ispezione e sul controllo per garantire un livello minimo accettabile di qualità, ma iniziava a considerare anche i costi associati agli scarti e alle rilavorazioni. Questo periodo segnò un passo avanti verso una maggiore efficienza produttiva e un'attenzione più consapevole alla gestione delle risorse (QualitiAmo, 2024).

Parallelamente alla Terza Rivoluzione Industriale, il concetto di qualità, denominata in questa fase 'Qualità 3.0', ha visto un'evoluzione significativa dovuta ai progressi tecnologici, alla crescente competizione globale e all'influenza di esperti della qualità come W. Edwards Deming e Joseph Juran. Durante questo periodo, la qualità è diventata una filosofia organizzativa completa, andando oltre la semplice rilevazione dei difetti per includere l'assicurazione della qualità e il miglioramento continuo dei processi. In questo periodo emersero nuove metodologie, come il Total Quality Management (TQM), ponendo enfasi sulla prevenzione dei difetti alla fonte, sull'incorporazione del riscontro dei clienti nello sviluppo dei prodotti e sull'inclusione della qualità in ogni fase del processo produttivo (Frick & Grudowski, 2023). La Terza Rivoluzione Industriale

6. Industria 4.0 vs Industria 5.0: il concetto di Qualità all'interno dei due paradigmi

coincise infatti con l'avvento delle prime tecnologie digitali e dei sistemi computerizzati, che permisero un significativo aumento della produttività. La Qualità 3.0 divenne un imperativo strategico per le aziende, poiché i clienti iniziavano ad aspettarsi prodotti di eccellenza. L'enfasi si spostò sul soddisfacimento dei requisiti dei clienti e sulla loro piena soddisfazione. Le aziende iniziarono ad adottare pratiche di miglioramento continuo per ottenere un vantaggio competitivo, riducendo i costi, gli scarti e le inefficienze. La produttività fu incrementata stabilizzando e standardizzando i processi produttivi, coinvolgendo tutti i lavoratori nel processo di creazione della qualità. Questo approccio portò a una maggiore integrazione delle pratiche di qualità in ogni fase del processo produttivo, promuovendo una cultura organizzativa orientata alla qualità (QualitiAmo, 2024).

Il percorso storico della qualità, dall'artigianato alla produzione di massa, fino all'approccio moderno della Qualità 4.0 e successivamente 5.0, evidenzia un progressivo affinamento delle metodologie e delle tecnologie utilizzate. Questo sviluppo ha permesso di passare da un controllo finale dei prodotti a un'integrazione della qualità in ogni fase del processo produttivo, riflettendo una maggiore attenzione alle esigenze e alle aspettative dei clienti. La continua evoluzione del concetto di qualità è essenziale per rispondere alle sfide poste dai rapidi cambiamenti tecnologici e dalla globalizzazione dei mercati (Frick & Grudowski, 2023).

6.2. Qualità 4.0

Il concetto di Qualità 4.0 rappresenta un'evoluzione significativa nel campo della gestione della qualità, resa possibile dalle tecnologie emergenti della Quarta Rivoluzione Industriale, nota anche come Industria 4.0. Questo concetto si basa sull'integrazione di tecnologie avanzate con le pratiche tradizionali di gestione della qualità, al fine di migliorare l'efficienza, la precisione e la rapidità delle decisioni relative alla qualità.

La Qualità 4.0 è emersa con l'avvento della quarta rivoluzione industriale, caratterizzata dall'integrazione di tecnologie avanzate come l'Internet of Things, l'intelligenza artificiale, i big data, e la produzione additiva nei processi industriali. I requisiti fondamentali della Qualità 4.0 includono la digitalizzazione dei processi riguardanti la funzione qualità, l'uso estensivo di sensori per il monitoraggio in tempo reale, e l'adozione di sistemi cyber-fisici (CPS) che consentono la comunicazione e l'interazione tra macchine e persone in tempo reale. Questa fase ha portato all'automazione dei processi

6. Industria 4.0 vs Industria 5.0: il concetto di Qualità all'interno dei due paradigmi

di ispezione e controllo qualità, riducendo il margine di errore umano e aumentando l'efficienza operativa (Frick & Grudowski, 2023). Un esempio ci viene fornito dalla BJC HealthCare, un'azienda sanitaria americana, che nel 2015 ha deciso di implementare la tecnologia RFID per il tracciamento e la gestione di migliaia di forniture mediche, utilizzando etichette elettroniche. In passato, il processo di monitoraggio dell'inventario richiedeva un notevole impiego di manodopera. Grazie all'utilizzo di questa tecnologia, BJC è riuscita a ridurre del 23% la quantità di scorte mantenute in loco presso ciascuna struttura. L'azienda prevede di ottenere risparmi pari a circa cinque milioni di dollari all'anno, una volta che l'etichettatura RFID sarà completamente implementata nelle proprie strutture. Come dimostra questo esempio, l'IIoT può migliorare significativamente le operazioni, aumentare l'efficienza, ridurre i costi e fornire una preziosa visibilità in tempo reale lungo l'intera catena di approvvigionamento (Manufacturing, 2024).

La Qualità 4.0 si fonda su un insieme integrato di tecnologie avanzate e pratiche di gestione che trasformano radicalmente il modo in cui la qualità viene gestita nelle moderne organizzazioni. Una delle caratteristiche distintive della Qualità 4.0 è la digitalizzazione estesa dei processi di qualità, che consente di raccogliere, analizzare e utilizzare dati in modo più efficiente e preciso. Questo approccio permette alle aziende di implementare strategie di gestione della qualità basate sui dati, migliorando così l'accuratezza delle decisioni e la tempestività degli interventi correttivi (Arsovski, 2019).

L'intelligenza artificiale (IA) e l'apprendimento automatico svolgono un ruolo cruciale nel framework della Qualità 4.0. Queste tecnologie permettono l'automazione di molte attività di controllo qualità, riducendo il margine di errore umano e aumentando la velocità e l'efficacia dei processi di ispezione. L'IA può essere utilizzata per analizzare grandi volumi di dati e identificare anomalie che potrebbero indicare problemi di qualità, mentre l'apprendimento automatico può migliorare continuamente la precisione dei modelli predittivi utilizzati per prevenire difetti (Arsovski, 2019). Ad esempio, la General Electric Aviation, un'azienda specializzata nella produzione di motori per aerei, ha adottato la piattaforma Predix, che sfrutta l'intelligenza artificiale e l'Internet of Things per migliorare i propri processi produttivi e la qualità dei prodotti. La piattaforma Predix, collegata ai macchinari attraverso sensori IoT, è in grado di monitorare l'intero processo produttivo e raccogliere dati in tempo reale sulle condizioni operative delle macchine e sui tempi di ciclo. Gli strumenti avanzati di analisi dei dati elaborano queste informazioni,

6. Industria 4.0 vs Industria 5.0: il concetto di Qualità all'interno dei due paradigmi

avvisando i lavoratori quando vengono identificati colli di bottiglia nelle operazioni di produzione oppure prevedendo i guasti delle apparecchiature (Digital, 2024).

La connettività avanzata è un'altra componente fondamentale della Qualità 4.0. Le tecnologie come l'Internet of Things e il cloud computing consentono la creazione di Sistemi Cyber-fisici che integrano macchine, sistemi di controllo e persone in un'unica rete interconnessa. Questo livello di connettività facilita la collaborazione e la condivisione delle informazioni in tempo reale tra diversi reparti e stakeholder, migliorando la trasparenza e la tracciabilità lungo tutta la catena del valore. Inoltre, l'uso del cloud computing permette di archiviare e analizzare grandi quantità di dati, rendendo possibile un monitoraggio continuo e un'analisi approfondita dei processi di qualità (Park, Shin, Park, & Lee, 2017) (Tadic, 2022).

L'analitica predittiva è essenziale per la Qualità 4.0, in quanto consente alle aziende di anticipare i problemi di qualità prima che si verifichino. Grazie alla capacità di elaborare e analizzare grandi quantità di dati, l'analitica predittiva identifica pattern e tendenze che potrebbero indicare futuri difetti nei prodotti o nei processi. Questa capacità proattiva di gestione della qualità aiuta a ridurre i tempi di inattività, minimizzare gli scarti e migliorare la soddisfazione del cliente (Arsovski, 2019).

Un altro aspetto chiave della Qualità 4.0 è l'integrazione della blockchain per aumentare la trasparenza e la tracciabilità delle transazioni e dei processi. La blockchain può essere utilizzata per creare registri immutabili che documentano ogni fase del ciclo di vita di un prodotto, dalla produzione alla consegna. Questo livello di trasparenza non solo migliora la fiducia tra i partner della catena di approvvigionamento, ma facilita anche la conformità alle normative e la gestione delle certificazioni di qualità (Saihi, Awad, & Ben-Daya, 2021).

Le tecnologie abilitanti, come i sensori avanzati, i software open-source e le reti 5G, giocano un ruolo fondamentale nell'ecosistema della Qualità 4.0. I sensori avanzati permettono di raccogliere dati in tempo reale dalle macchine e dai processi di produzione, fornendo informazioni dettagliate e tempestive sulle prestazioni e sulle condizioni operative. I software open-source offrono la flessibilità e la scalabilità necessarie per sviluppare soluzioni personalizzate di gestione della qualità, mentre le reti 5G garantiscono una connettività veloce e affidabile, essenziale per il funzionamento continuo dei sistemi cyber-fisici (Saihi, Awad, & Ben-Daya, 2021). L'utilizzo di queste

6. Industria 4.0 vs Industria 5.0: il concetto di Qualità all'interno dei due paradigmi

tecnologie permette alle aziende di trasformare digitalmente i propri impianti, come ad esempio l'azienda Bosch che ha integrato sensori avanzati all'interno dei macchinari presenti nelle fabbriche. Questi sensori, collegati con i server presenti all'interno dell'impianto, monitorano l'intero processo produttivo raccogliendo dati sulle condizioni operative delle macchine. Una volta raccolti, gli strumenti avanzati di analisi dei dati elaborano tali informazioni in tempo reale, avvisando i lavoratori quando vengono identificati colli di bottiglia nelle operazioni di produzione. Inoltre, adottare questo approccio consente di prevedere i guasti delle apparecchiature, permettendo alla fabbrica di pianificare le operazioni di manutenzione con ampio anticipo rispetto al verificarsi di eventuali malfunzionamenti. Di conseguenza, la fabbrica è in grado di mantenere i macchinari operativi per periodi di tempo più estesi. Bosch afferma che analizzando i dati in questo modo ha contribuito a un incremento della produzione superiore al 10% in alcune aree, migliorando al contempo la puntualità delle consegne e la soddisfazione dei clienti (Manufacturing, 2024).

Infine, la Data Science è centrale per la Qualità 4.0, in quanto fornisce gli strumenti e le tecniche per analizzare i dati complessi raccolti dai vari sistemi e sensori. La Data Science consente di sviluppare modelli predittivi e di simulazione che aiutano le aziende a ottimizzare i processi di qualità, migliorare le prestazioni dei prodotti e adattarsi rapidamente ai cambiamenti del mercato. Grazie a queste capacità, le organizzazioni possono prendere decisioni più informate e basate sui dati, migliorando così l'efficacia complessiva della gestione della qualità (Park, Shin, Park, & Lee, 2017).

In sintesi, la Qualità 4.0 rappresenta un approccio rivoluzionario alla gestione della qualità, basato sull'integrazione di tecnologie avanzate come l'IA, l'IoT, la blockchain e l'analitica predittiva. Queste tecnologie consentono una gestione della qualità più efficiente, precisa e proattiva, migliorando la competitività e la capacità di innovazione delle aziende. Nonostante i numerosi vantaggi, l'implementazione della Qualità 4.0 presenta anche diverse sfide, tra cui la necessità di sviluppare competenze digitali adeguate all'interno delle organizzazioni e la gestione dei cambiamenti culturali necessari per adottare nuove tecnologie. Inoltre, è cruciale sviluppare modelli di maturità per valutare il livello di prontezza delle organizzazioni all'adozione della Qualità 4.0 e identificare le lacune da colmare (Saihi, Awad, & Ben-Daya, 2021). Il concetto di Qualità 4.0 rappresenta una trasformazione radicale nella gestione della qualità, integrando tecnologie avanzate per migliorare l'efficienza, la precisione e la reattività dei processi di

6. Industria 4.0 vs Industria 5.0: il concetto di Qualità all'interno dei due paradigmi

qualità. Con l'evoluzione continua delle tecnologie digitali, le opportunità per innovare e migliorare ulteriormente la gestione della qualità sono immense, aprendo la strada a un futuro in cui la qualità è gestita in modo più intelligente e connesso, come sarà possibile osservare con la definizione del concetto di Qualità 5.0.

6.3. Qualità 5.0

La Quinta Rivoluzione Industriale, nota come Industria 5.0, rappresenta un'evoluzione significativa rispetto ai paradigmi precedenti, enfatizzando una collaborazione sinergica tra esseri umani e tecnologie avanzate. Questo approccio non solo ottimizza la produzione ma mira anche a promuovere un impatto positivo sulla società e l'ambiente. All'interno di questo contesto, la Qualità 5.0 emerge come un concetto centrale, progettato per integrare il controllo della qualità in ogni fase del processo produttivo, adottando un approccio proattivo per prevenire difetti e inefficienze. La Qualità 5.0 rappresenta un'evoluzione ulteriore del concetto di qualità, inserendosi nel contesto della Quinta Rivoluzione Industriale. Questo nuovo paradigma integra i benefici della Qualità 4.0 ma pone un'enfasi maggiore sull'aspetto umano e sulla sostenibilità. I requisiti principali della Qualità 5.0 includono l'integrazione di tecnologie avanzate come l'IA e l'apprendimento automatico non solo per il monitoraggio e l'analisi, ma anche per la previsione e la prevenzione dei difetti. Inoltre, la Qualità 5.0 promuove una maggiore collaborazione tra esseri umani e macchine, con l'obiettivo di creare prodotti personalizzati che soddisfino le esigenze specifiche dei clienti. In passato, la personalizzazione dei prodotti significava perdere parte del volume e, di conseguenza, era disponibile solo a un prezzo superiore. Tuttavia, ora i consumatori possono effettuare ordini per vestiti, telefoni cellulari e persino automobili personalizzate, che possono essere prodotte su larga scala e consegnate a ciascun consumatore in tempo. Questo è possibile grazie alla capacità dei robot e di altre macchine di essere configurati rapidamente e poi riconfigurati per adattarsi alle diverse specifiche fornite dal cliente. È interessante notare come queste tendenze non sono evidenti solo nel B2C (business to consumer) ma anche nel B2B (business to business). Ad esempio, Hoffman, una sussidiaria di Pentair, fornisce armadi elettrici personalizzati. Altri settori B2B come l'edilizia e la produzione di vetro stanno adottando modelli di personalizzazione di massa con un focus sulle tecnologie di stampa 3D (Hoffmann & Mehta, 2024). Per creare un processo produttivo agile e flessibile, in grado di rispondere alle esigenze del mercato, le aziende stanno ora utilizzando il concetto di "modularizzazione". La modularità si riferisce alla capacità di un sistema di essere

6. Industria 4.0 vs Industria 5.0: il concetto di Qualità all'interno dei due paradigmi

riconfigurato su base plug-and-play, permettendogli così di rispondere ai cambiamenti nelle esigenze dei clienti in modo rapido ed efficiente. Ad esempio, Audi ha testato questa metodologia creando postazioni di lavoro indipendenti, ciascuna assegnata a una particolare funzione produttiva. Le auto incomplete si spostano autonomamente da una postazione all'altra con l'aiuto di sistemi di trasporto senza conducente. Se un componente raggiunge una stazione già occupata, il sistema è programmato per dirigersi verso un'altra stazione disponibile, eliminando così i ritardi tipici della linea di assemblaggio convenzionale. Questo assemblaggio modulare consente anche di apportare modifiche in corso d'opera. Audi ha collaborato con Arculus, un produttore di sistemi di produzione modulari, per testare questo nuovo metodo di produzione nella loro fabbrica di Ingolstadt, in Germania, e prevede un aumento della produttività del 20%. Anche le aziende chimiche e farmaceutiche tedesche stanno sviluppando concetti modulari flessibili per i loro impianti di lavorazione, il che ha portato a ottenere una riduzione del time-to-market fino al 40%, risparmi energetici del 30%, costi operativi inferiori del 20% e una riduzione del 40% delle spese in conto capitale (Hoffmann & Mehta, 2024). Grazie all'utilizzo di questo sistema le personalizzazioni e altre modifiche possono essere effettuate senza incorrere in costi aggiuntivi. Questo approccio mira a migliorare la soddisfazione del cliente, l'engagement dei dipendenti e la responsabilità sociale delle aziende (Tadic S. D., 2023).

La Qualità 5.0 si distingue per l'integrazione di componenti tecnologiche avanzate che svolgono un ruolo cruciale nell'assicurare la qualità del prodotto attraverso l'intero ciclo di vita. Durante la fase di progettazione, l'uso di software avanzati consente ai produttori di creare prototipi virtuali, condurre test di stress e identificare potenziali difetti prima della costruzione di un prototipo fisico. Questo approccio permette un controllo di qualità più accurato ed efficiente sin dalle prime fasi dello sviluppo del prodotto, riducendo il rischio di problemi successivi e migliorando l'efficienza complessiva del processo produttivo (Frick & Grudowski, 2023).

L'ispezione dei prodotti è rivoluzionata dai sistemi di visione artificiale alimentati dall'intelligenza artificiale, che eseguono ispezioni automatizzate con una precisione superiore rispetto agli ispettori umani. Gli algoritmi di apprendimento automatico utilizzati in questi sistemi migliorano continuamente grazie all'esperienza accumulata, aumentando l'accuratezza e l'affidabilità del controllo qualità (Tadic, 2022).

6. Industria 4.0 vs Industria 5.0: il concetto di Qualità all'interno dei due paradigmi

Nel contesto della consegna, le catene di fornitura abilitate dall'IoT permettono il monitoraggio in tempo reale dei prodotti durante tutto il processo di spedizione. Questo garantisce che i prodotti raggiungano i clienti nelle condizioni ottimali, migliorando la soddisfazione del cliente e riducendo i rischi di danni durante il trasporto (Tadic, 2022).

Infine, i sistemi di feedback alimentati dall'intelligenza artificiale elaborano il riscontro dei clienti in modo efficiente, identificando tendenze e implementando miglioramenti basati su queste informazioni. Questo ciclo continuo di feedback e miglioramento assicura che la qualità del prodotto e la soddisfazione del cliente vengano costantemente elevate, adattandosi rapidamente ai cambiamenti nelle esigenze e nelle aspettative del mercato (Tadic, 2022).

La Qualità 5.0 integra tecnologie avanzate in tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto, dalla progettazione alla consegna fino al feedback post-vendita. Questo approccio proattivo e tecnologicamente avanzato non solo migliora la qualità del prodotto ma ottimizza anche l'efficienza operativa e la soddisfazione del cliente, rendendo la gestione della qualità più reattiva e dinamica che mai.

La differenza principale tra Qualità 4.0 e Qualità 5.0 risiede nell'approccio e nell'obiettivo finale. Mentre la Qualità 4.0 si concentra prevalentemente sull'automazione e sull'efficienza tramite l'uso delle tecnologie digitali, la Qualità 5.0 si distingue per il suo approccio proattivo e umano-centrico. La Qualità 5.0 non solo mira a prevenire i difetti attraverso l'analisi predittiva ma enfatizza anche la personalizzazione dei prodotti e il miglioramento della qualità della vita dei dipendenti e dei clienti. Inoltre, la Qualità 5.0 integra principi di sostenibilità, cercando di minimizzare l'impatto ambientale attraverso l'uso efficiente delle risorse e la riduzione degli sprechi (Tadic S. D., 2023).

In Tabella 4 è riportato un confronto dei concetti di Qualità 4.0 e Qualità 5.0 in vari aspetti chiave: la Qualità 4.0 è stata fondamentale per poter migliorare i processi produttivi attraverso l'automazione e l'analisi dei dati, mentre la Qualità 5.0 incorpora questi progressi tecnologici e aggiunge una dimensione umana e sostenibile, in particolare valorizzando la collaborazione uomo-macchina e la personalizzazione per il cliente finale.

6. Industria 4.0 vs Industria 5.0: il concetto di Qualità all'interno dei due paradigmi

	Qualità 4.0	Qualità 5.0
Focus Tecnologico	Uso intensivo di IoT, Big Data, IA, AR e blockchain	Integrazione di tecnologie avanzate con attenzione all'aspetto umano
Automazione	Alto livello di automazione dei processi	Automazione avanzata con enfasi sulla collaborazione
Monitoraggio e Controllo	Monitoraggio in tempo reale con sensori IoT	Monitoraggio in tempo reale con enfasi sulla sostenibilità
Collaborazione Uomo-Macchina	Collaborazione limitata, maggiormente automatizzata	Alta, con robot adattivi che lavorano con gli umani
Sostenibilità	Non prioritario	Priorità alta, integrazione di pratiche sostenibili
Personalizzazione	Limitata, focus sull'efficienza	Alta, prodotti e servizi personalizzati
Trasparenza e Tracciabilità	Uso della blockchain per la tracciabilità	Uso della blockchain per trasparenza e fiducia
Esempi pratici	Digital Twin, Cobots, Realtà Aumentata	Adaptive Robots, Produzione Sostenibile, Personalizzazione dei Prodotti

Tabella 4: confronto tra Qualità 4.0 e Qualità 5.0

In termini di sostenibilità, la Qualità 5.0 pone una forte enfasi sulla gestione ambientale, riducendo i consumi energetici e utilizzando risorse sostenibili, contribuendo alla protezione ambientale e alla conformità alle normative ambientali. Inoltre, l'engagement e l'empowerment dei dipendenti sono elementi chiave, migliorando la produttività, l'innovazione e il benessere lavorativo (Frick & Grudowski, 2023). Anche la Qualità 5.0 presenta delle sfide, in particolare per quanto riguarda la necessità di una forza lavoro altamente qualificata in grado di collaborare efficacemente con le tecnologie avanzate. La gestione della privacy dei dati e la sicurezza informatica diventano ancora più cruciali, data la quantità crescente di dati personali raccolti e analizzati per personalizzare i prodotti. Inoltre, l'implementazione di un approccio sostenibile richiede un impegno

6. Industria 4.0 vs Industria 5.0: il concetto di Qualità all'interno dei due paradigmi

significativo in termini di risorse e può comportare costi iniziali elevati. La transizione verso un modello di Qualità 5.0 richiede anche un cambiamento culturale all'interno delle organizzazioni, che devono abbracciare una mentalità orientata alla sostenibilità e alla responsabilità sociale (Tadic S. D., 2023).

Entrambi i paradigmi offrono vantaggi distinti ma presentano anche sfide uniche che le organizzazioni devono affrontare per massimizzare i benefici e mitigare i rischi. La transizione da Qualità 4.0 a Qualità 5.0 richiede una strategia ben pianificata che consideri non solo gli aspetti tecnologici ma anche quelli culturali e organizzativi, per garantire un miglioramento continuo della qualità e della sostenibilità.

7. Conclusioni

Il confronto tra Industria 4.0 e Industria 5.0 mette in luce un'evoluzione significativa del paradigma industriale contemporaneo, evidenziando come le tecnologie avanzate possano essere integrate in modi diversi per ottenere risultati migliorativi. L'Industria 4.0 ha rappresentato una svolta epocale, promuovendo l'automazione, l'interconnessione e l'analisi dei dati in tempo reale. Questi elementi hanno rivoluzionato i processi produttivi, incrementando l'efficienza e la produttività e ridefinendo il concetto di qualità come precisione e standardizzazione. Tuttavia, l'Industria 5.0 introduce una nuova dimensione, focalizzandosi sulla centralità della figura umana e sulla sostenibilità. Questo paradigma non solo mantiene le innovazioni della Quarta Rivoluzione Industriale, ma le espande per creare un ambiente produttivo più inclusivo e responsabile. La Qualità, in questo contesto, non è più vista solo in termini di prodotto finale, ma anche in termini di impatto ambientale e benessere dei lavoratori.

L'analisi ha evidenziato che, mentre l'Industria 4.0 si concentra su tecnologie come l'Internet of Things, l'Intelligenza Artificiale e i Sistemi Cyber-fisici, l'Industria 5.0 integra queste tecnologie con principi di sostenibilità, resilienza e human-centricity. Questo nuovo approccio favorisce la creazione di valore non solo economico, ma anche sociale e ambientale, rispondendo alle crescenti esigenze di una società più consapevole e responsabile. L'avvento del paradigma industriale 5.0 introduce notevoli benefici, sottolineando un progresso significativo rispetto ai modelli precedenti. Questo nuovo paradigma enfatizza una transizione dalla manutenzione preventiva alla manutenzione predittiva, caratterizzata dall'impiego di sensori intelligenti e dispositivi IoT. Tali strumenti consentono di monitorare le condizioni operative delle macchine in tempo reale e prevedere eventuali malfunzionamenti, permettendo interventi di manutenzione focalizzati esclusivamente sulle macchine a rischio. Di conseguenza, si registra un miglioramento dell'efficienza operativa e una riduzione dei costi associati ai periodi di inattività. Inoltre, la sostenibilità rappresenta una componente cruciale dell'Industria 5.0. La produzione intelligente mira a un utilizzo più razionale delle risorse, allineandosi con le esigenze attuali. Parallelamente, si osserva un incremento nell'efficienza e nella produttività umana; le tecnologie avanzate riportano l'elemento umano al centro del processo produttivo. I robot collaborativi assumono il compito di eseguire le operazioni

7. Conclusioni

più ripetitive e pericolose, consentendo agli esseri umani di dedicarsi a compiti di natura creativa e strategica.

Tuttavia, la transizione verso l'Industria 5.0 comporta anche sfide significative. È indispensabile lo sviluppo delle competenze degli operatori, i quali devono imparare a collaborare efficacemente con i robot avanzati e acquisire nuove abilità tecniche. La programmazione dei robot industriali e l'adattamento ai nuovi ruoli lavorativi richiedono competenze tecniche avanzate e un impegno costante nella formazione. L'implementazione di queste tecnologie avanzate richiede un investimento considerevole in termini di tempo e risorse finanziarie. Le imprese sono chiamate a investire in software personalizzati, robotica collaborativa, intelligenza artificiale e sistemi di monitoraggio in tempo reale. Gli investimenti necessari possono rappresentare una barriera significativa, specialmente per le piccole e medie imprese. Inoltre, l'adozione dell'intelligenza artificiale e dell'automazione introduce potenziali rischi per la sicurezza digitale, rendendo imperativo l'adozione di robuste misure di sicurezza per mitigare le vulnerabilità emergenti.

Sebbene l'Industria 5.0 sia più vicina di quanto ci si aspettasse, il fenomeno è ancora agli inizi e i meccanismi attraverso cui le tecnologie abilitanti possono promuovere la centralità umana e socio-centrica sono empiricamente mal definiti. In effetti, le tecnologie emergenti come l'intelligenza artificiale possono rappresentare una lama a doppio taglio quando si tratta del concetto di centralità umana. Ad esempio, se non regolamentata adeguatamente, l'IA potrebbe sostituire professioni umane che sono straordinariamente difficili da automatizzare. Pertanto, rimane la domanda su chi promuoverà la centralità umana nell'ambito dell'Industria 5.0. Se i governi intendono promuovere avanzamenti tecnologici centrati sull'uomo, quale quadro legislativo dovrebbe essere creato e quali programmi di supporto dovrebbero essere sviluppati? Affrontare queste domande apre una strada entusiasmante e vitale per la ricerca futura. La ricerca futura è invitata a delineare come gli attori dell'Industria 5.0 possano governare l'avanzamento tecnologico e garantire che lo sviluppo e la distribuzione delle tecnologie emergenti in questo quadro prioritizzino l'inclusione di diversi stakeholder e delle loro prospettive, in particolare di coloro storicamente emarginati o sottorappresentati nella trasformazione industriale digitale.

7. Conclusioni

Analogamente all'Industria 4.0, i progressi introdotti dall'Industria 5.0 andranno oltre l'industria manifatturiera, impattando altri settori come la sanità, i trasporti, le costruzioni e l'energia. Si incoraggia la ricerca futura ad espandere le criticità e le opportunità che il paradigma industriale 5.0 possa portare per ciascun settore, identificando tecnologie abilitanti, principi, valori e componenti unici per ogni industria.

Inoltre, è cruciale guidare le aziende attraverso le attuali priorità della Commissione Europea, dato che sono già in linea con i concetti dell'Industria 5.0. È essenziale che le aziende considerino gli impatti a lungo termine dei cambiamenti su tutti i loro beni: beni fisici, informazioni, dipendenti, fornitori e clienti. Le implicazioni sociali, psicologiche ed etiche, il ruolo mutevole delle risorse umane e della tecnologia dell'informazione, l'apprendimento e la competizione con i robot potrebbero diventare criticità se non gestite correttamente.

Questo scenario rappresenta già una sfida significativa, poiché il lavoro nell'Industria 5.0 richiede un insieme unico di talenti, aumentando la consapevolezza delle lacune di competenze e della necessità di riqualificazione e aggiornamento delle competenze a tutti i livelli, specialmente nella produzione. Inoltre, la distinzione tra coloro che sono nati e cresciuti in costante interazione con la tecnologia e le generazioni più anziane che devono imparare a usare la tecnologia in età avanzata, è rilevante poiché c'è una differenza significativa nel modo in cui le informazioni vengono ricevute ed elaborate. Questo potrebbe essere esplorato in studi futuri per comprendere e sviluppare un sistema che si adatti a entrambi i casi. Solo attraverso una governance tecnologica inclusiva alla trasformazione industriale sarà possibile realizzare appieno le potenzialità dell'Industria 5.0.

In conclusione, la transizione da Industria 4.0 a Industria 5.0 rappresenta un passo cruciale verso un futuro industriale più sostenibile e adatto alle esigenze delle figure umane. Questa evoluzione richiede non solo l'adozione di nuove tecnologie, ma anche un cambiamento culturale che metta al centro la qualità della vita e la sostenibilità. Solo attraverso un approccio integrato e responsabile sarà possibile realizzare il pieno potenziale di questi paradigmi, garantendo uno sviluppo industriale armonioso e sostenibile per le future generazioni.

8. Bibliografia e Sitografia

- Abomhara, M., & Koien, G. M. (2015). Cyber Security and the Internet of Things: Vulnerabilities, Threats, Intruders and Attacks. *Journal of Cyber Security*, 4(1), 65-88. doi:10.13052/jcsm2245-1439.414
- Adel, A. (2022). Future of industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective research areas. *Journal of Cloud Computing*, 11(40), 1-15. doi:10.1186/s13677-022-00314-5
- Ahuja, B., Karg, M., & Schmidt, M. (2015). *Additive manufacturing in production: challenges and opportunities*. San Francisco: SPIE LASE. doi:10.1117/12.2082521
- Alami, R. (2013). On human models for collaborative robots. *International Conference on Collaboration Technologies and Systems* (p. 191-194). San Diego: HAL open science. doi:10.1109/CTS.2013.6567228
- alevanni. (2024, Aprile 30). *Seconda Rivoluzione Industriale*. Tratto da alevanni.ilbello: <http://alevanni.ilbello.com/>
- Aquilani, B., Piccarozzi, M., Abbate, T., & Codini, A. (2020). The Role of Open Innovation and Value Co-creation in the Challenging Transition from Industry 4.0 to Society 5.0: Toward a Theoretical Framework. *sustainability*, 12(21), 1-21. doi:10.3390/su12218943
- Arsovski, S. (2019). SOCIAL ORIENTED QUALITY: FROM QUALITY 4.0 TOWARDS QUALITY 5.0. *13th International Quality Conference*. 13, p. 397-404. Kragujevac: Center for Quality. Tratto da <http://pesjournal.net/journal/v1-n2/37.pdf>
- Assolombarda. (2024, Luglio 7). *Indice di digitalizzazione dell'economia e della società (DESI) - 2022*. Tratto da Assolombarda: <https://www.assolombarda.it/centro-studi/indice-di-digitalizzazione-dell2019economia-e-della-societa-desi-2022>
- Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. *In Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355-385. doi:10.1162/pres.1997.6.4.355
- Banafa, A. (2016, Agosto 29). *The Internet of Everything (IoE)*. Tratto da BBVA OpenMind: <https://www.bbvaopenmind.com/en/technology/digital-world/the-internet-of-everything-ioe/>
- Becher, B., & Bheda, O. (2024, Marzo 29). *Understanding Blockchain Technology*. Tratto da builtin: <https://builtin.com/blockchain>
- Boss, G., Malladi, P., Quan, D., Linda, L., & Hall, H. (2007). *Cloud Computing*. New York: IBM Corporation. Tratto da https://www.academia.edu/download/30844301/Cloud_computing_wp_final_80ct.pdf
- Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). *Industry 5.0 - Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. Directorate-General for Research

8. Bibliografia e Sitografia

- and Innovation, Publications Office of the European Union. Bruxelles: European Commission. doi:10.2777/308407
- BUCAP. (2024, Aprile 30). *Differenze tra dati strutturati, semi strutturati e non strutturati*. Tratto da BUCAP: <https://www.bucap.it/news/approfondimenti-tematici/digitalizzazione-documenti/dati-strutturati-semi-non-strutturati.htm>
- Buratti, C., Conti, A., Dardari, D., & Verdone, R. (2009). An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution. *Sensors*, 9(9), 6869-6896. doi:10.3390/s90906869
- Calenda, C. (2016). *Piano Nazionale Industria 4.0*. Ministero dello Sviluppo Economico. Roma: Italian Trade Agency. Tratto da https://www.mimit.gov.it/images/stories/documenti/Piano_Industria_40.pdf
- Commission, E. (2022). *Digital Economy and Society Index (DESI) 2022*. Bruxelles: European Commission. Tratto da <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi>
- Commission, E. (2024, Luglio 7). *Europe's Digital Decade: digital targets for 2030*. Tratto da European Commission: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/europes-digital-decade-digital-targets-2030_en
- Craigien, D., Diakun-Thiabault, N., & Purse, R. (2014). Defining Cybersecurity. *Technology Innovation Management Review*, 4(10), 13-21. Tratto da https://www.timreview.ca/sites/default/files/article_PDF/Craigien_et_al_TIMReview_October2014.pdf
- Deleryd, M., & Fundin, A. (2020). Towards societal satisfaction in a fifth generation of quality – the sustainability model. *Total Quality Management & Business*, 1-17. doi:10.1080/14783363.2020.1864214
- Demir, K. A., & Cicibas, H. (2017). The Next Industrial Revolution: Industry 5.0 and Discussions on Industry 4.0. *4th International Management Information Systems Conference "Industry 4.0"* (p. 1-9). İstanbul: İstanbul University. Tratto da https://www.researchgate.net/publication/336653504_The_Next_Industrial_Revolution_Industry_50_and_Discussions_on_Industry_40
- Digital, G. (2024, Giugno 20). *PREDIX The application platform for digital industrial solutions*. Tratto da GE: https://www.ge.com/digital/sites/default/files/download_assets/Predix-from-GE-Digital-Overview-Brochure.pdf#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Fwww.ge.com%2Fdigital%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fdownload_assets%2FPredix
- Dima, A. (2024, Aprile 10). *Short history of manufacturing: from Industry 1.0 to Industry 4.0*. Tratto da KFactory: <https://kfactory.eu/short-history-of-manufacturing-from-industry-1-0-to-industry-4-0/>

8. Bibliografia e Sitografia

- Dumbill, E. (2012, Gennaio 11). *What is big data? An introduction to the big data landscape*. Tratto da Radar O'Reilly: <http://radar.oreilly.com/2012/01/what-is-big-data.html>
- Enterprise, H. P. (2024, Maggio 14). *Cos'è l'edge computing?*. Tratto da Hewlett Packard Enterprise: <https://www.hpe.com/it/it/what-is/edge-computing.html>
- Eurodrive, S. (2024, Aprile 26). *Smart Factory: cos'è, come funziona ed esempi delle industrie intelligenti 4.0*. Tratto da SEW Eurodrive: <https://blog.sew-eurodrive.it/smart-factory-cos-e-come-funziona-la-fabbrica-intelligente>
- Evans, D. (2012). *The Internet of Everything How More Relevant and Valuable Connections Will Change the World*. Tratto da Cisco: https://www.cisco.com/c/dam/global/en_my/assets/ciscoinnovate/pdfs/loE.pdf
- Fast-Berglund, A., Palmkvist, F., Nyqvist, P., Ekered, S., & Akerman, M. (2016). Evaluating Cobots for Final Assembly. *Procedia CIRP*, 44, 175-180. doi:10.1016/j.procir.2016.02.114
- Federation, K. J. (2016, Aprile 19). *Toward realization of the new economy and society - Reform of the economy and society by the deepening of "Society 5.0"*. Tratto da Keidanren: https://www.keidanren.or.jp/en/policy/2016/029_outline.pdf
- Foundation, W. M. (2019). *THE 2019 WORLD MANUFACTURING FORUM REPORT SKILLS FOR THE FUTURE OF MANUFACTURING*. Milano: World Manufacturing Foundation. Tratto da <https://www.primorski-tp.si/wp-content/uploads/2019/12/THE-2019-WORLD-MANUFACTURING-FORUM-REPORT.pdf>
- Fraga-Lamas, P., Fernandez-Carames, T. M., Blanco-Novoa, Oscar, & Vilar-Montesinos, M. (2018). A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard. *IEEE Access*, 6, 13358-13375. doi:10.1109/ACCESS.2018.2808326
- Frick, J., & Grudowski, P. (2023). Quality 5.0: A Paradigm Shift Towards Proactive Quality Control in Industry 5.0. *Asia-Pacific Journal of Business Administration*, 14(2), 51-56. doi:10.5430/ijba.v14n2p51
- Friedman, B., & Hendry, D. G. (2019). *Value Sensitive Design Shaping Technology with Moral Imagination*. Londra: The MIT Press. doi:10.7551/mitpress/7585.001.0001
- Friis, D. (2016). *Cobots Expand Automation Opportunities*. Francoforte: International Federation of Robotics. Tratto da https://ifr.org/downloads/press/02_2016/Editorial_WR_Industrial_Robots_2016.pdf
- Gebhardt, A. (2011). *Understanding Additive Manufacturing*. Monaco di Baviera: Hanser Publishers. doi:10.3139/9783446431621
- Gervasi, R., Digiario, F. N., Mastrogiacomo, L., Maisano, D. A., & Franceschini, F. (2020). Comparing quality profiles in Human-Robot Collaboration: empirical evidence in the automotive sector. *4th International Conference on Quality*

8. Bibliografia e Sitografia

- Engineering and Management* (p. 89-114). Braga: International Conference on Quality Engineering and Management. Tratto da <https://iris.polito.it/handle/11583/2846568?mode=full>
- Gervasi, R., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2020). A conceptual framework to evaluate human-robot collaboration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108, 841-865. doi:10.1007/s00170-020-05363-1
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Tseng, M.-L., Grybauskas, A., Stefanini, A., & Amran, A. (2023). Behind the definition of Industry 5.0: a systematic review of technologies, principles, components, and values. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 40(6), 432-447. doi:10.1080/21681015.2023.2216701
- Giacobone, A. (2024, Maggio 5). *Alla scoperta dei robot collaborativi (cobot): 10 domande per conoscerli meglio!* Tratto da alumotion: <https://www.alumotion.eu/2019/11/alla-scoperta-dei-robot-collaborativi-cobot-10-domande-per-conoscerli-meglio/>
- Glossary, G. (2024, Aprile 30). *Big Data*. Tratto da Gartner Information Technology Glossary: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/big-data>
- Grieves, M. (2015, Marzo 3). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. Tratto da ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication
- Gunasekaran, A., Subramanian, N., & Ngai, W. T. (2019). Quality management in the 21st century enterprises: research pathway towards industry 4.0. *International Journal of Production Economics*, 207, 125-129. doi:10.1016/j.ijpe.2018.09.005
- Halevi, G., & Moed, H. F. (2012, Settembre). The evolution of big data as a research and scientific topic: Overview of the literature. *Research Trends*, 1(30), 3-6. Tratto da <https://www.researchtrends.com/cgi/viewcontent.cgi?article=1151&context=researchtrends>
- Hayashi, Y. (2019). Japanese Science and Technology Basic Plan: A Perspective of Policy Process. *Innovation and Development Policy*, 1(1), 24-38. doi:10.3724/SP.J.2096-5141.2019.0003
- He, Q., Li, L., Li, D., Peng, T., Zhang, X., Cai, Y., . . . Tang, R. (2024). From Digital Human Modeling to Human Digital Twin: Framework and Perspectives in Human Factors. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 37(9), 1-14. doi:10.1186/s10033-024-00998-7
- Heyer, C. (2010). Human-robot interaction and future industrial robotics applications. *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (p. 4749-4754). Taipei: IEEE. doi:10.1109/IROS.2010.5651294
- Hitachi. (2017). *Society 5.0: Aiming for a New Human-centered Society : Japan's Science and Technology Policies for Addressing Global Social Challenges*. Tratto da Hitachi Inspire the Next: https://www.hitachi.com/rev/archive/2017/r2017_06/trends/index.html

8. Bibliografia e Sitografia

- Hoffmann, J., & Mehta, D. (2024). *Industry 4.0: in-depth market analysis*. Amburgo: Statista. Tratto da <https://www.statista.com/study/66974/in-depth-report-industry-40/>
- Horejsi, P. (2015). Augmented Reality System for Virtual Training of Parts Assembly. *Procedia Engineering*, 100, 699-706. doi:10.1016/j.proeng.2015.01.422
- Houbing, S., Danda B., R., Sabina, J., & Christian, B. (2016). *Cyber-Physical Systems: Foundations, Principles and Applications*. Amsterdam: Elsevier AP. doi:10.1016/C2015-0-00708-0
- Hozdić, E. (2015). SMART FACTORY FOR INDUSTRY 4.0: A REVIEW. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 7(1), 28-35. Tratto da https://modtech.ro/international-journal/vol7no12015/Hozdic_Elvis.pdf
- Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 1191-1203. doi:10.1007/s00170-012-4558-5
- Huang, Y., Leu, M. C., Mazumder, J., & Donmez, A. (2015). Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(1), 1-10. doi:10.1115/1.4028725
- International, A. (2012). *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. Ginevra: ASTM International. Tratto da <https://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>
- Internet4Things. (2021, Gennaio 15). *Internet of Everything, cos'è, come si differenzia dall'IoT*. Tratto da Internet4Things: <https://www.internet4things.it/iot-library/internet-of-everything-cose-come-si-differenzia-dalliot/>
- Internet4Things. (2024, Aprile 26). *Cyber physical systems (CPS), cosa sono, come stanno rivoluzionando il mondo industriale*. Tratto da Internet4Things: <https://www.internet4things.it/industry-4-0/cyber-physical-systems-cps-cosa-sono-come-stanno-rivoluzionando-il-mondo-industriale/>
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Securing the future of German manufacturing industry Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Francoforte: acatech. Tratto da <https://www.din.de/resource/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>
- Koch, P. J., van Amstel, M. K., Debska, P., Thormann, M. A., Tetzlaff, A. J., Bogh, S., & Chrysostomou, D. (2017). A Skill-based Robot Co-worker for Industrial Maintenance Tasks. *Procedia Manufacturing*, 11, 83-90. doi:10.1016/j.promfg.2017.07.141
- LaNotiziaWeb. (2024, Aprile 30). *COME FUNZIONA LA TECNOLOGIA DEL CLOUD COMPUTING*. Tratto da LaNotiziaWeb: <https://www.lanotiziaweb.it/2021/come-funziona-la-tecnologia-del-cloud-computing/>

8. Bibliografia e Sitografia

- Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431-440. doi:10.1016/j.bushor.2015.03.008
- Leong, Y. K., Tan, J. H., Chew, K. W., & Show, P. L. (2021). Significance of Industry 5.0. In P. L. Show, K. W. Chew, & T. C. Ling, *The Prospect of Industry 5.0 in Biomanufacturing* (p. 1-20). Boca Raton: CRC Press. doi:10.1201/9781003080671
- Liao, Y., Deschamps, F., de Freitas Rocha Loures, E., & Ramos, L. F. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3609-3629. doi:10.1080/00207543.2017.1308576
- Longo, F., Padovano, A., & Umbrello, S. (2020). Value-Oriented and Ethical Technology Engineering in Industry 5.0: A Human-Centric Perspective for the Design of the Factory of the Future. *applied sciences*, 10(12), 1-25. doi:10.3390/app10124182
- Maddikunta, P. K., Quoc-Viet, P., Prabadevi, B., Deepa, N., Dev, K., Gadekallu, T. R., . . . Liyanage. (2022). Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. *Journal of Industrial Information Integration*, 26, 1-31. doi:10.1016/j.jii.2021.100257
- Manufacturing, A. A. (2024, Giugno 20). *Industry 4.0: 7 Real-World Examples of Digital Manufacturing in Action*. Tratto da amfg.ai: <https://amfg.ai/2019/03/28/industry-4-0-7-real-world-examples-of-digital-manufacturing-in-action/>
- Manyika, J., Chui, M., Brown, B., Bughin, J., Dobbs, R., Roxburgh, C., & Byers, A. H. (2011). *Big Data: The next frontier for innovation, competition, and productivity*. Chicago: McKinsey Global Institute. Tratto da https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/big%20data%20the%20next%20frontier%20for%20innovation/mgi_big_data_exec_summary.pdf
- Mell, P., & Timothy, G. (2011). *The NIST Definition of Cloud*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology Special Publication 800-145. Tratto da <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/sp/nistspecialpublication800-145.pdf>
- Mellor, S., Hao, L., & Zhang, D. (2014). Additive manufacturing: A framework for implementation. *International Journal of Production Economics*, 149, 194-201. doi:10.1016/j.ijpe.2013.07.008
- Metropolitan, R. (2024, Aprile 30). *I FRATELLI WRIGHT E IL PRIMO VOLO DELL'UOMO*. Tratto da Metropolitan Magazine: <https://metropolitanmagazine.it/fratelli-wright-volo/>
- Mohajan, H. K. (2019, Ottobre 17). The First Industrial Revolution: Creation of a New Global Human Era. *Journal of Social Sciences and Humanities*, 5(4), 377-387. Tratto da https://mpr.a.ub.uni-muenchen.de/96644/1/MPRA_paper_96644.pdf
- Mohajan, H. K. (2020, Gennaio 14). The Second Industrial Revolution has Brought Modern Social and Economic Developments. *Journal of Social Sciences and*

8. Bibliografia e Sitografia

- Humanities*, 6(1), 1-14. Tratto da https://mpr.aub.uni-muenchen.de/98209/1/MPRA_paper_98209.pdf
- Mohajan, H. K. (2021, Dicembre 6). Third Industrial Revolution Brings Global Development. *Journal of Social Sciences and Humanities*, 7(4), 239-251. Tratto da https://mpr.aub.uni-muenchen.de/110972/1/MPRA_paper_110972.pdf
- Muller, J. (2020). *Enabling Technologies for Industry 5.0 - Results of a workshop with Europe's technology leaders*. Directorate-General for Research and Innovation, Publications Office. Bruxelles: European Commission. doi:10.2777/082634
- Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0 - A Human-Centric Solution. *Sustainability*, 11(16), 1-13. doi:10.3390/su11164371
- Nambiar, A. N. (2009). RFID Technology: A Review of its Applications. *World Congress on Engineering and Computer Science*. 2, p. 1253-1259. San Francisco: S. I. Ao and Craig Douglas and W. S. Grundfest and Jon Burgstone. Tratto da https://www.iaeng.org/publication/WCECS2009/WCECS2009_pp1253-1259.pdf
- Narvaez Rojas, C., Alomia Penafiel, G. A., Loaiza Buitrago, D. F., & Tavera Romero, C. A. (2021). Society 5.0: A Japanese Concept for a Superintelligent Society. *sustainability*, 13(12), 1-16. doi:10.3390/su13126567
- Ostergaard, E. H. (2016, Maggio 6). *Industry 5.0 – Return of the human touch - Universal Robots*. Tratto da Universal Robots: <https://www.universal-robots.com/blog/industry-50-return-of-the-human-touch/>
- Paelke, V. (2014). Augmented reality in the smart factory: Supporting workers in an industry 4.0. environment. *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)* (p. 1-4). Barcelona: IEEE. doi:10.1109/ETFA.2014.7005252
- Park, S. H., Shin, W. S., Park, Y. H., & Lee, Y. (2017). Building a new culture for quality management in the era of the Fourth Industrial Revolution. *Total Quality Management & Business Excellence*, 28(9-10), 934-945. doi:10.1080/14783363.2017.1310703
- Popkova, E. G., Ragulina, Y. V., & Bogoviz, A. V. (2019). *Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century*. Berlino: Springer. doi:10.1007/978-3-319-94310-7
- PrimeIT. (2024, Maggio 1). *IaaS, PaaS and SaaS: the structure, the differences and the Cloud professional*. Tratto da PrimeITConsulting: <https://www.primeitconsulting.ch/en/iaas-paas-and-saas-the-structure-the-differences-and-the-cloud-professional/>
- 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. doi:10.1109/ACCESS.2018.2793265

8. Bibliografia e Sitografia

- QualitiAmo. (2024, Maggio 17). *ISO 9001 E QUALITY 4.0 Che cos'è la qualità 4.0 e come si rapporta alla ISO 9001:2015?* Tratto da QualitiAmo - La Qualità gratis sul web: <https://www.qualitiamo.com/ISO%209001/iso-9001-2015-quality-40.html>
- Rada, M. (2015, Dicembre 1). *INDUSTRY 5.0 - from virtual to physical*. Tratto da LinkedIn: <https://www.linkedin.com/pulse/industry-50-from-virtual-physical-michael-rada/>
- Rada, M. (2017, Febbraio 3). *INDUSTRY 5.0 definition*. Tratto da Medium: <https://michael-rada.medium.com/industry-5-0-definition-6a2f9922dc48>
- Rasim, A., Yadigar, I., & Sukhostat, L. (2018). Cyber-physical systems and their security issues. *Computers in Industry*, 100, 212-223. doi:10.1016/j.compind.2018.04.017
- Rinalducci, S. N. (2024, Aprile 10). *Industry 1.0 To 4.0 – Brief History Of The Industrial Revolution*. Tratto da Sustainability Success: <https://sustainability-success.com/industry-1-0-to-4-0-2-3-revolution/>
- ROBOTS. (2024, Aprile 30). *Unimate*. Tratto da ROBOTS YOUR GUIDE TO THE WORLD OF ROBOTICS: <https://robotsguide.com/robots/unimate>
- Rubmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*. Boston: The Boston Consulting Group. Tratto da https://web-assets.bcg.com/img-src/Industry_40_Future_of_Productivity_April_2015_tcm9-61694.pdf
- Rusconi, G. (2014, Giugno 26). *Gesti e movimenti del viso per guidare l'auto: Ford e Intel studiano "Mobii"*. Tratto da IlSole24Ore: https://st.ilsole24ore.com/art/motori/2014-06-26/gesti-e-movimenti-viso-guidare-auto-ford-e-intel-studiano-mobii-135032.shtml?uuid=ACIDksqB&refresh_ce=1
- S.U., C. 4. (2024, Aprile 30). *LA RIVOLUZIONE INDUSTRIALE IN INGHILTERRA: IL SETTORE TESSILE*. Tratto da vitoformari.blogspot: <https://vitoformari.blogspot.com/2015/12/la-rivoluzione-industriale-settore.html>
- Saihi, A., Awad, M., & Ben-Daya, M. (2021). Quality 4.0: leveraging Industry 4.0 technologies to improve quality management practices – a systematic review. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 40(2), 628-650. doi:10.1108/IJQRM-09-2021-0305
- Sapuppo, V. G. (2024, Luglio 7). *2030 digital decade: i valori Ue al centro della trasformazione digitale*. Tratto da Agenda Digitale: <https://www.agendadigitale.eu/cittadinanza-digitale/2030-digital-decade-i-valori-ue-al-centro-della-trasformazione-digitale/>
- Shrouf, F., Ordieres, J., & Miragliotta, G. (2014). Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. *2014 IEEE International Conference on Industrial*

8. Bibliografia e Sitografia

- Engineering and Engineering Management* (p. 697-701). Selangor: IEEE. doi:10.1109/IEEM.2014.7058728
- Skilton, M., & Hovsepian, F. (2018). *The 4th Industrial Revolution: Responding to the Impact of Artificial Intelligence on Business*. Londra: Palgrave Macmillan. doi:10.1007/978-3-319-62479-2
- Standard, I. (2005). *Information technology — Security techniques — Code of practice for information security management*. Ginevra: ISO/IEC. Tratto da <https://portalcip.org/wp-content/uploads/2019/07/ISO27001.pdf>
- Statista. (2019). *Smart factories*. Amburgo: Statista. Tratto da <https://www.statista.com/study/47965/smart-factories/>
- Statista. (2024). *Digital transformation*. Amburgo: Statista. Tratto da <https://www.statista.com/study/74997/dossier-digital-transformation/>
- Statista. (2024). *Internet of Things (IoT)*. Amburgo: Statista. Tratto da <https://www.statista.com/study/27915/internet-of-things-iot-statista-dossier/>
- Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40, 536-541. doi:10.1016/j.procir.2016.01.129
- Summit, C.-P. S. (2008, Aprile 24, 25). "Holistic Approaches to Cyber-Physical Integration". St. Louis, Missouri, Stati Uniti.
- Tadic, D. M. (2022). Phases of quality development: Concluding with the concept of quality 5.0. *Tehnika*, 77(5), 643-647. doi:10.5937/tehnika2205643T
- Tadic, S. D. (2023). The Quality 5.0 model in the function of production personalization and user satisfaction. *Tehnika*, 78(1), 97-102. doi:10.5937/tehnika2301097T
- Team, H. 6. (2021, Novembre). *6G: The Next Horizon*. Tratto da Huawei: <https://www.huawei.com/en/huaweitech/future-technologies/6g-the-next-horizon>
- Tecno4Industry. (2024, Aprile 28). *Smart Factory: il nuovo modello di fabbrica nato dall'Industria 4.0*. Tratto da Tecno4Industry: <https://tecno4industry.it/smart-factory/>
- Todorovich, P. (2024, Aprile 30). *L'Internet delle cose (IoT): cos'è e come lo stiamo già usando in prodotti e servizi*. Tratto da NetworkDigital360: <https://www.zerounoweb.it/analytics/big-data/internet-of-things-iot-come-funziona/>
- Ularu, E. G., Puican, F. C., Apostu, A., & Velicanu, M. (2012). Perspectives on Big Data and Big Data Analytics. *Database Systems Journal*, 3(4), 3-14. Tratto da <http://dbjournal.ro/archive/10/10.pdf>
- Union, I. T. (2024, Maggio 4). *Definition of cybersecurity*. Tratto da ITU Committed to connecting the world: <https://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/com17/Pages/cybersecurity.aspx>
- Verizon. (2010, Dicembre 12). *New Verizon Home Monitoring and Control Service Will Make the Concept of the 'Connected Home' a Reality*. Tratto da Verizon:

8. Bibliografia e Sitografia

- <https://www.verizon.com/about/news/press-releases/new-verizon-home-monitoring-and-control-service-will-make-concept-connected-home-reality>
- von Solms, R., & van Niekerk, J. (2013). From information security to cyber security. *Computers & Security*, 38, 97-102. doi:10.1016/j.cose.2013.04.004
- Wang, P., Gao, R. X., & Fan, Z. (2015). Cloud Computing for Cloud Manufacturing: Benefits and Limitations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(4), 1-9. doi:10.1115/1.4030209
- Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1), 1-8. doi:10.1155/2016/3159805
- Wikipedia. (2024, Aprile 15). *ENIAC*. Tratto da Wikipedia L'enciclopedia libera: <https://it.wikipedia.org/wiki/ENIAC>
- Wikipedia. (2024, Maggio 1). *Google App Engine*. Tratto da Wikipedia L'enciclopedia libera: https://en.wikipedia.org/wiki/Google_App_Engine
- Wikipedia. (2024, Aprile 14). *Macchina a vapore di James Watt*. Tratto da Wikipedia L'enciclopedia libera: https://it.wikipedia.org/wiki/Macchina_a_vapore_di_James_Watt
- Wikipedia. (2024, Aprile 15). *Robot Industriale*. Tratto da Wikipedia L'enciclopedia libera: https://it.wikipedia.org/wiki/Robot_industriale#:~:text=George%20Devol%20fu%20il%20primo,Engelberger%20nel%201956.
- Wikipedia. (2024, Aprile 30). *Storage Area Network*. Tratto da Wikipedia L'enciclopedia libera: https://it.wikipedia.org/wiki/Storage_Area_Network
- Wikipedia. (2024, Aprile 15). *Unimate*. Tratto da Wikipedia L'enciclopedia libera: <https://it.wikipedia.org/wiki/Unimate>
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0 - Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530-535. doi:10.1016/j.jmsy.2021.10.006
- ZeroUno. (2024, Maggio 14). *Edge computing, cos'è, come funziona e come implementarlo*. Tratto da ZeroUnoWeb: <https://www.zerounoweb.it/techtarget/searchdatacenter/edge-computing-cose-come-implementarlo/>
- Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2015). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. *12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)* (p. 2147-2152). Zhangjiajie: IEEE. doi:10.1109/FSKD.2015.7382284