# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

# LA COMPLEMENTARITÀ DELLE TECNOLOGIE DI INDUSTRIA 4.0


**Relatore**
Prof. Daniele Battaglia

**Candidato**
Giovanni Marocco


Anno Accademico 2020/2021

# Indice

**INTRODUZIONE** ..... **1**

**1. INDUSTRIA 4.0** ..... **3**

1.1: VERSO LA QUARTA RIVOLUZIONE INDUSTRIALE ..... 3

1.2: I PRINCIPI CARDINE DI INDUSTRIA 4.0 ..... 5

1.3: PROGRAMMI A SUPPORTO DELLA DIFFUSIONE DI INDUSTRIA 4.0 ..... 6

*1.3.1: Diffusione di Industria 4.0 in Europa* ..... 6

1.3.1.1: Horizon 2020 ..... 7

1.3.1.2: Horizon Europe ..... 8

*1.3.2: Diffusione di Industria 4.0 in Italia* ..... 10

1.3.2.1: Piano Nazionale Industria 4.0 ..... 10

1.3.2.2: Piano Transizione 4.0 ..... 11

1.4: INDUSTRIA 4.0 A SUPPORTO DELLA CRISI PANDEMICA DA COVID-19 ..... 12

**2: LE TECNOLOGIE DI INDUSTRIA 4.0** ..... **14**

2.1: AREE DI COMPETENZA DELLE TECNOLOGIE I4.0 ..... 15

*2.1.1: Front-End Technologies* ..... 16

2.1.1.1: Smart Manufacturing ..... 16

2.1.1.2: Smart Product ..... 20

2.1.1.3: Smart Supply-Chain ..... 21

2.1.1.4: Smart Working ..... 23

*2.1.2: Base Technologies* ..... 25

2.2: TECNOLOGIE ABILITANTI ..... 27

*2.2.1: Advanced Manufacturing Solutions* ..... 28

*2.2.2: Additive Manufacturing* ..... 29

*2.2.3: Augmented Reality* ..... 30

*2.2.4: Simulations* ..... 31

*2.2.5: Horizontal and Vertical integration* ..... 32

*2.2.6: Internet of Things (IoT)* ..... 33

*2.2.7: Cloud Computing* ..... 34

*2.2.8: Cyber-security* ..... 34

*2.2.9: Big Data Analytics* ..... 35
2.3: ALCUNI BENEFICI DELLE TECNOLOGIE I4.0 ..... 35
*2.3.1: Sicurezza* ..... 36
*2.3.2: Sostenibilità ambientale* ..... 38
2.3.2.1: Economia circolare ..... 38
**3. LA COMPLEMENTARITÀ DELLE TECNOLOGIE DI INDUSTRIA 4.0 ..... 40**
3.1 LA RICERCA ..... 40
*3.1.1 Team di ricerca* ..... 40
*3.1.2 Risultati attesi* ..... 41
*3.1.3 La domanda di ricerca* ..... 42
*3.1.4 La metodologia di ricerca* ..... 43
3.2 LE INTERVISTE ..... 45
*3.2.1 Intervista 1* ..... 46
*3.2.2 Intervista 2* ..... 47
*3.2.3 Intervista 3* ..... 49
*3.2.4 Intervista 4* ..... 51
*3.2.5 Intervista 5* ..... 52
*3.2.6 Intervista 6* ..... 53
*3.2.7 Intervista 7* ..... 55
3.3 ANALISI DEI RISULTATI ..... 58
*3.3.1 Le tecnologie più rilevanti per le imprese* ..... 58
*3.3.2 L'impatto sui processi e sulle performance di impresa* ..... 59
*3.3.3 Le Complementarità tecnologiche* ..... 62
3.4 IL RISULTATO DELLA RICERCA ..... 65
**CONCLUSIONI ..... 66**
**BIBLIOGRAFIA ..... 69**
**SITOGRAFIA ..... 70**

# Introduzione

Nel corso degli ultimi decenni, il progresso tecnologico ha portato ad una vera e propria rivoluzione dell'ambiente economico, sociale e culturale, e in particolar modo ha condizionato in maniera irreversibile il panorama industriale globale.

Il presente elaborato rappresenta il contributo ad un progetto di ricerca condotto da quattro giovani ricercatori appartenenti a differenti atenei universitari italiani, che ha come obiettivo l'analisi della quarta rivoluzione industriale, altrimenti detta Industria 4.0, ponendo una lente di ingrandimento sulle tecnologie caratterizzanti il percorso di trasformazione digitale delle aziende.

Il punto di partenza è rappresentato dall'analisi della letteratura attuale e del panorama industriale europeo e italiano, per poi proseguire con un focus sulla complementarità delle tecnologie, riscontrata sulle performance economico-finanziarie delle imprese. Quest'ultima tematica, oggetto principale della ricerca, sarà trattata attraverso le testimonianze di ricercatori ed esperti nel settore, intervistati con l'obiettivo di verificare e dimostrare la presenza di un comportamento sinergico di particolari combinazioni di tecnologie.

Nel primo capitolo, sarà analizzato il fenomeno di Industria 4.0, partendo dalle rivoluzioni industriali precedenti, dalla sua definizione e dai suoi principi cardine. Successivamente saranno descritti i programmi di incentivo alla diffusione della trasformazione digitale stanziati prima dall'Unione Europea, e dopo dal Ministero dello Sviluppo Economico italiano. Il primo capitolo si conclude con l'analisi del contributo delle tecnologie di Industria 4.0 a supporto della crisi pandemica da Covid-19, che ha colpito incondizionatamente tutti gli attori presenti nel panorama industriale globale. Infatti, alcune tecnologie hanno avuto un ruolo centrale in questo contesto, portando le

aziende ad accelerare i propri processi di digitalizzazione, con l'obiettivo di aiutarle nella gestione dell'emergenza sanitaria e di ridurre le conseguenze economiche.

Dopo una prima analisi della diffusione di quello che è a tutti gli effetti un nuovo paradigma tecnologico, nel corso del secondo capitolo si entra nel dettaglio con una revisione teorica delle principali tecnologie caratterizzanti Industria 4.0, svolta attraverso due differenti punti di vista. In primo luogo, si considerano le tecnologie in base alle aree di competenza interne alle imprese, suddividendole in Front-End Technologies e Base Technologies. Dopodiché, il numero di tecnologie analizzate verrà ridotto a nove tecnologie, definite abilitanti dal Ministero dello Sviluppo Economico. Per concludere, verranno approfonditi alcuni dei principali benefici riscontrati, con particolare riferimento al tema della sicurezza sul lavoro e della sostenibilità ambientale.

Con il terzo capitolo, si entra nel vivo del progetto di ricerca che mira a verificare la presenza di complementarità tra le tecnologie analizzate nei capitoli precedenti e del conseguente impatto in termini di performance di impresa. Nella prima parte verrà analizzata la domanda di ricerca e della metodologia utilizzata, per poi analizzare singolarmente le sette interviste condotte. Quest'ultime saranno approfondite attraverso la descrizione degli argomenti più salienti, facendo particolare attenzione ai singoli contributi degli intervistati portati al progetto di ricerca. Infine, il terzo capitolo dell'elaborato si conclude con l'analisi dei risultati ottenuti dalle interviste, riassunti in un framework che ha l'obiettivo di essere un quadro di riferimento per i manager delle aziende e per i policy-makers, da adottare nelle scelte riguardanti gli investimenti tecnologici.

Per concludere, il quarto e ultimo capitolo è caratterizzato dalle considerazioni finali e dalle più rilevanti opportunità future.

# 1. INDUSTRIA 4.0

## 1.1: Verso la quarta rivoluzione industriale

Con il termine I4.0 ci si riferisce tipicamente alla quarta rivoluzione industriale, che corrisponde al fenomeno di integrazione di innovazioni tecnologiche radicali all'interno del processo di produzione, al fine di migliorarne le attività principali, le abitudini dei lavoratori, la metodologia di lavoro e le relazioni umane; andando ad impattare interamente a livello economico, culturale e sociale, tutte le imprese appartenenti all'ambito tipicamente manifatturiero.

Volendo fare un breve excursus storico, descritto in Figura 1, si può partire dalla prima rivoluzione industriale, avvenuta verso la fine del diciottesimo secolo e caratterizzata dall'utilizzo di macchine azionate da energia meccanica, e dall'introduzione di potenza vapore per il funzionamento degli stabilimenti produttivi.

Intorno all'inizio del ventesimo secolo avvenne la seconda rivoluzione industriale, grazie alla diffusione della produzione di massa e delle catene di montaggio, ottenute con l'introduzione dell'elettricità, dei prodotti chimici, e del petrolio.

Successivamente, verso i primi anni '70, con lo sviluppo dei primi robot industriali e dei computer, realizzati attraverso l'utilizzo dell'elettronica e dell'IT, per automatizzare ulteriormente la produzione, si entra nella terza rivoluzione industriale. Al giorno d'oggi ci troviamo all'interno della quarta rivoluzione industriale, che si distingue per la connessione tra sistemi fisici e digitali, complesse analisi attraverso Big Data e adattamenti real-time dei sistemi, il tutto reso possibile dall'utilizzo di macchine intelligenti, interconnesse e collegate ad internet.

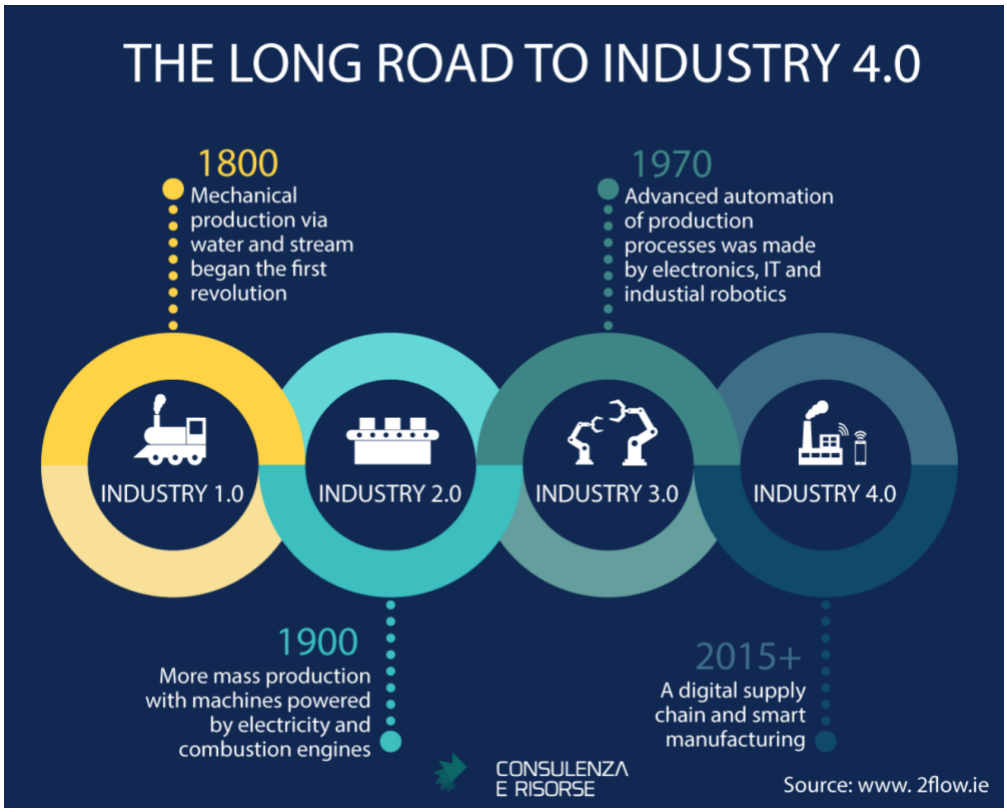


**Figura 1:** Schema riassuntivo delle quattro rivoluzioni industriali.

La quarta rivoluzione industriale, denominata anche Industria 4.0, è attualmente uno degli argomenti più comuni in ambito industriale e accademico.

Il termine Industria 4.0, o meglio Industry 4.0, nasce in seguito alla presentazione del piano industriale del governo tedesco, avvenuta nel 2011 alla fiera di Hannover, in Germania, e concretizzato successivamente verso la fine del 2013. Il tema principale riguardava la realizzazione di investimenti in infrastrutture, scuole, sistemi energetici, enti di ricerca e aziende, da effettuare con l'obiettivo di ammodernare il sistema produttivo tedesco, e riportare la manifattura tedesca ai vertici mondiali mediante l'introduzione di alcune nuove tecnologie produttive realizzate per migliorare le condizioni di lavoro e aumentare la produttività, e la qualità, degli impianti manifatturieri tedeschi.

L'industria 4.0, infatti, non riguarda una singola invenzione rivoluzionaria, ma comprende diversi "ingredienti tecnologici" che si trovano ancora oggi in continua evoluzione.

## 1.2: I principi cardine di Industria 4.0

La quarta rivoluzione industriale vede le sue fondamenta nei seguenti principi cardine, i quali vanno ad impattare direttamente le dinamiche aziendali e l'organizzazione interna aumentando la redditività e le performance di impresa. Questi principi possono essere sintetizzati in quattro punti principali:

- **Trasparenza dell'Informazione**: grazie ai sistemi cyber-fisici (CPS) e alla loro capacità di integrarsi con la realtà che li circonda, reperire e utilizzare dati. Grazie a questo elemento, viene garantita l'accessibilità immediata alle informazioni, in qualsiasi posto e in qualsiasi momento in cui ci si possa trovare.

- **Interoperabilità**: vengono utilizzate procedure che facilitano e consentono l'interscambio e l'interazione fra persone, macchinari e dispositivi. Per fare questo è necessario verificare sempre la compatibilità fra i differenti macchinari presenti in azienda ed eventuali altri dispositivi tecnologici.

- **Processo decisionale decentrato**: tipicamente i processi decisionali all'interno di un'azienda sono centralizzati, tuttavia esistono particolari tecnologie che permettono ai diversi dispositivi di prendere alcune semplici decisioni. Il grande vantaggio di questo punto cardine è la riduzione delle tempistiche necessarie e delle risorse allocate, comportando un diretto impatto positivo sulle performance aziendali in termini di efficienza.

- **Assistenza tecnica**: uno degli obiettivi principali della quarta rivoluzione industriale è quello di creare sistemi che siano in grado di aiutare e supportare i lavoratori durante le loro attività manuali, operazioni di decision making e di problem solving.

## 1.3: Programmi a supporto della diffusione di Industria 4.0

Il governo tedesco non è stato l'unico protagonista della diffusione di Industria 4.0, poiché i vantaggi derivanti dallo sviluppo di un modello industriale avanzato e sostenibile sono stati riconosciuti fin da subito a livello globale.
Per questa ragione, le istituzioni Europee e Nazionali di competenza hanno formulato determinati incentivi fiscali in grado di permettere alle piccole, medie e grandi imprese, di poter effettuare investimenti mirati all'introduzione delle tecnologie proposte da Industria 4.0. Prima di analizzare il piano proposto dal governo italiano, è opportuno iniziare dai programmi presentati dall'Unione Europea.

### 1.3.1: Diffusione di Industria 4.0 in Europa

Con l'obiettivo di superare le grandi sfide della trasformazione digitale, affrontate dalle imprese, la maggior parte dei governi dei paesi europei ha creato programmi e piani di investimento dedicati a Industria 4.0, con l'obiettivo di spingere le imprese verso la digitalizzazione dei propri sistemi di produzione. Questo meccanismo parte dalle linee guida presentate dall'Unione Europea, in particolare con il programma Horizon, rimarcate e rimodellate poi nei singoli programmi nazionali, dove in base ai principali settori di competenza sono state approfondite diverse aree di intervento. In Germania e in Francia, ad esempio, i drivers di riferimento per i piani di investimento nazionali sono

l'Internet of Things (IoT) e i Cyber-Phisical Systems (CPS); in Italia e in Svezia invece, il focus principale riguarda la sostenibilità dei sistemi produttivi; in Spagna ruota tutto intorno allo scambio di informazioni, in maniera da spingere le imprese verso il nuovo paradigma tecnologico; infine in Olanda, il tema principale è la riduzione dei costi di produzione e l'adeguamento alle esigenze imposte dal mercato.

Negli ultimi anni, l'Unione Europea (UE) ha realizzato due importanti programmi per la ricerca e l'innovazione: Horizon 2020 (2014-2020) e Horizon Europe (2021-2027); approfonditi nei seguenti capitoli.

### *1.3.1.1: Horizon 2020*

Il primo, Horizon 2020, consiste principalmente nel trasferimento delle grandi idee provenienti da differenti dipartimenti di ricerca e sviluppo, dai laboratori al mercato, e quindi all'interno della realtà industriale. Esclusi gli investimenti nazionali pubblici e privati, il fondo Europeo stanziato per Horizon 2020 corrisponde a circa 80 miliardi di euro di finanziamenti, e si concretizza attorno a tre principali aree di intervento, descritti in Figura 2: Eccellenza scientifica, Leadership industriale e Sfide per la società.

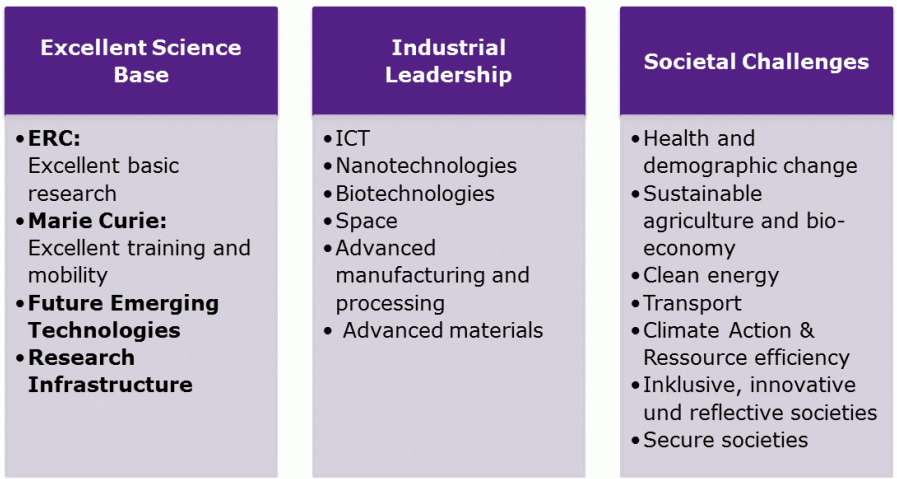


**Figura 2**: I tre pilastri di Horizon 2020.

L'obiettivo principale è quello di assicurare che l'Europa sia in grado di produrre scienza e tecnologia, e che possa essere esportata in tutto il mondo, stimolando una crescita economica dei paesi membri.

### *1.3.1.2: Horizon Europe*

Il secondo programma per la ricerca e l'innovazione presentato dall'Unione Europea, denominato Horizon Europe, prevede la disposizione di 95,5 miliardi di euro, dedicati alla realizzazione di attività per sostenere i ricercatori europei mediante meccanismi di borse di studio, corsi di formazioni e scambi tra differenti comunità scientifiche. Il meccanismo di scambio dei ricercatori tra i vari paesi membri dell'Unione Europea consentirà la creazione di ecosistemi dell'innovazione europei connessi ed efficienti, e la nascita di eccellenti infrastrutture destinate alla ricerca, rafforzando allo stesso tempo l'*European Research Area* (ERA).

Lo "spazio europeo della ricerca", vede le sue origini intorno all'anno 2000, con la prerogativa di creare un unico mercato per la ricerca, innovazione e tecnologia, senza alcun tipo di confine. Durante il periodo di attività, ha conseguito importanti risultati a livello mondiale, rivelandosi però di difficile gestione nel contesto socioculturale più recente. Per questo motivo, con il programma Horizon Europe, si cerca di riaffermare il ruolo dell'ERA, migliorarne la definizione e la popolarità, e coinvolgere i ricercatori europei che ancora non ne hanno preso parte.

I fondi verranno principalmente destinati alla ricerca e all'innovazione necessaria per raggiungere il Green Deal Europeo, con l'obiettivo dell'Unione Europea di diventare, entro il 2050, il primo continente neutro in termini di impatto climatico. Verranno finanziati i progetti che mirano a divulgare la scienza dei cambiamenti climatici, e che progettano misure di gestione e adattamento ai cambiamenti climatici e alle emissioni dei gas serra.

In seconda battuta, ma non per importanza, Horizon Europe destinerà i fondi alla realizzazione del decennio digitale europeo, e ad azioni destinate a consolidare la visione delle nuove imprese digitali, basate sul pieno sfruttamento delle tecnologie e degli strumenti digitali presentati da Industria 4.0. Saranno coinvolti ambiti di ricerca e innovazione relativi al tema del dato, settori riguardanti l'assistenza sanitaria, i media, attività inerenti al patrimonio culturale e all'economia creativa, ambito energetico, mobilità e produzione alimentare; il tutto con il principale obiettivo di creare e modernizzare i modelli industriali. Per fare ciò, Horizon Europe, principalmente nel biennio iniziale, ovvero 2021-2022, dovrà destinare le sue risorse allo sviluppo e l'implementazione di tecnologie digitali di base.

Infine, l'ultima area di intervento di Horizon Europe, riguarda i fondi per gli investimenti destinati a risollevare le imprese dai danni economici casati dalla pandemia da Covid-19, tema approfondito nel Capitolo 1.4.

In parallelo al programma NextGeneration EU, meglio noto in Italia con i nomi informali di Recovery Fund, o Recovery Plan, i finanziamenti di Horizon Europe porteranno il loro contributo alla ricostruzione di un'Europa post-pandemia più Green e più digitale, più pronta e reattiva alle sfide attuali e future.

In Figura 3 sono rappresentate le tre macroaree di intervento di Horizon Europe: Eccellenza scientifica, Competitività a livello globale e il tema dell'innovazione.

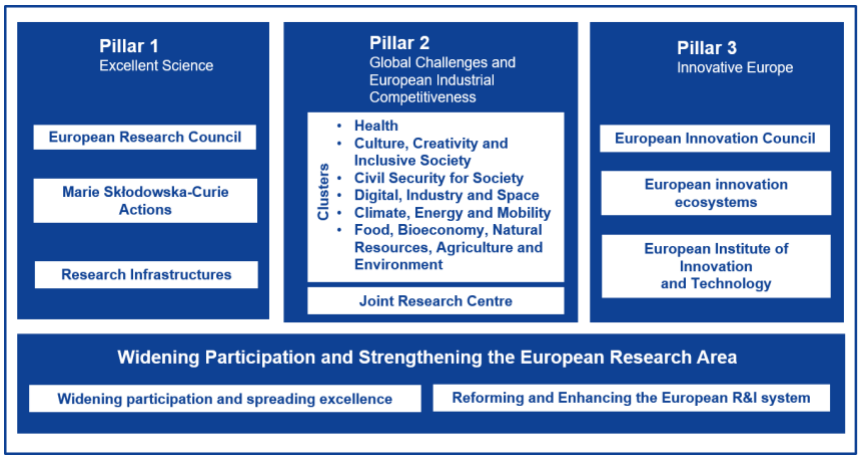


**Figura 3:** I pilastri di Horizon Europe.

## 1.3.2: Diffusione di Industria 4.0 in Italia

Dopo aver delineato le manovre presentate dall'Unione Europea per la transizione digitale, in particolare con Horizon 2020 e Horizon Europe, è opportuno spostare la lente di ingrandimento sul panorama italiano e sui due programmi più recenti: "Piano Nazionale Industria 4.0" e "Piano Transizione 4.0".

### *1.3.2.1: Piano Nazionale Industria 4.0*

Nel settembre del 2016, grazie all'approvazione dell'ex Presidente del Consiglio, Matteo Renzi, e dal Ministro dello Sviluppo Economico, Carlo Calenda, è stato presentato il "Piano Nazionale Industria 4.0". Tale piano aveva l'obiettivo di innovare e rafforzare l'implementazione degli strumenti proposti dalla quarta rivoluzione industriale, tramite meccanismi di sostegno finanziario e affiancamento formativo per le imprese. Il Piano Nazionale Industria 4.0 ha analizzato da due aspetti principali: gli investimenti innovativi e l'evoluzione delle competenze. Parlando di Investimenti Innovativi si considerano: investimenti privati rivolti a rinnovare i macchinari presenti all'interno dello stabilimento grazie alla presenza di un super-ammortamento, di investimenti in tecnologie digitali grazie all'iper-ammortamento, di investimenti da parte delle imprese in Ricerca e sviluppo, e di un meccanismo di enforcement degli assetti finanziari delle imprese. Analizzando invece l'evoluzione delle competenze, è opportuno sottolineare il fatto che l'Industria 4.0 non preveda solamente una trasformazione digitale, ma che abbia notevoli impatti a livello culturale, andando a rivoluzionare completamente il mercato del lavoro, quindi in particolare i lavoratori. Per questo motivo il Piano Nazionale Industria 4.0, propone una serie di iniziative appositamente dedicate, come i corsi di formazione svolti direttamente nelle scuole e

nelle università, la nascita dei Competence Center (CC) rivolti principalmente alle attività di ricerca, e l'istituzione dei Digital Innovation Hub (DIH) dedicati ad attività di valutazione e supporto per le imprese interessate alla trasformazione digitale.

Nei capitoli seguenti, grazie alle testimonianze di alcuni membri dei Competence Center e dei Digital Innovation Hub del panorama italiano, le cui caratteristiche e gli obiettivi principali sono descritti in Figura 4, verrà approfondito il loro ruolo centrale all'interno della diffusione di Industria 4.0 a livello nazionale.

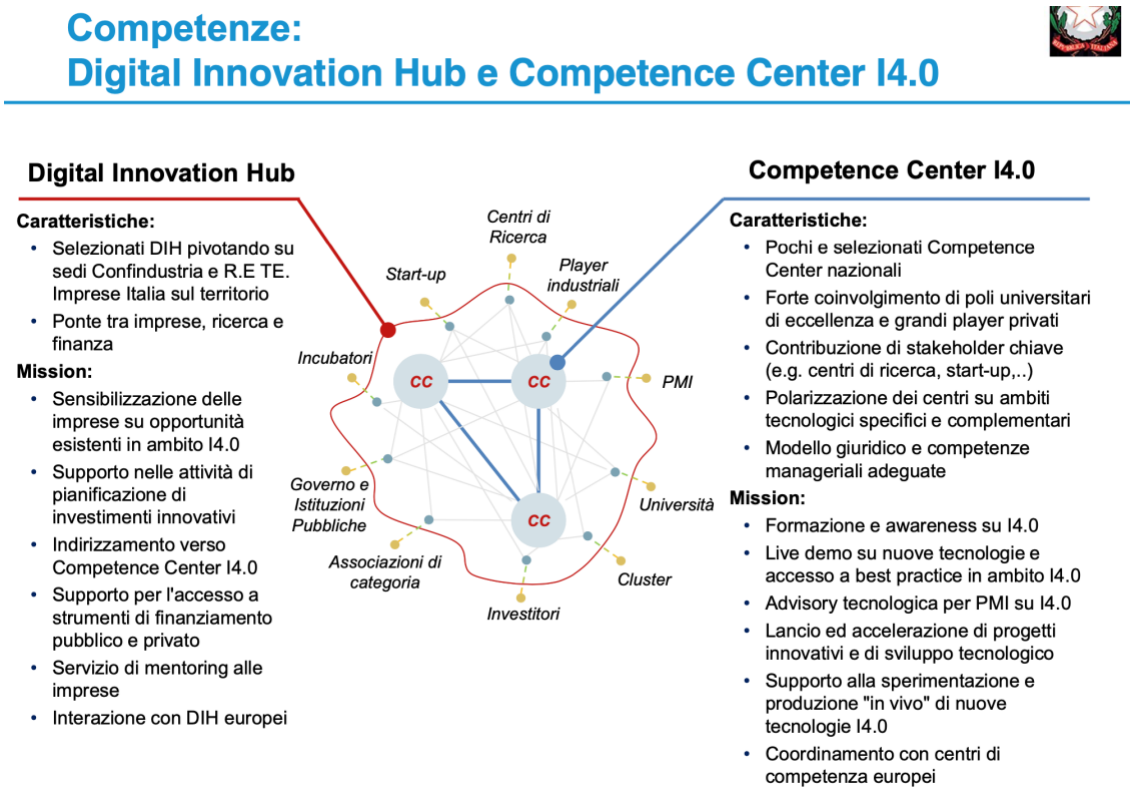


**Figura 4:** Caratteristiche e responsabilità dei Competence Center e dei Digital Innovation Hub.

### *1.3.2.2: Piano Transizione 4.0*

Successivamente, dopo il Piano Nazionale Industria 4.0, nel 2020 è stato presentato il nuovo programma nazionale rivolto ai temi di Industria 4.0, ovvero il "Piano Transizione 4.0". Con la Legge di Bilancio 2020 e il Piano Transizione 4.0, piano

biennale per il periodo che va dal 2021 al 2023, le agevolazioni derivanti dall'iper-ammortamento e dal super-ammortamento, sono state sostituite con il credito di imposta, con diverse aliquote in base alle categorie di beni e con un tetto di 18,45 miliardi di euro. Gli obiettivi principali del Piano Transizione 4.0 sono: stimolare gli investimenti privati e dare stabilità e certezze alle imprese. In particolare, con gli investimenti privati si intendono gli investimenti per beni materiali e immateriali, I4.0 e non, investimenti in Ricerca e Sviluppo, innovazione, Design e Green, ed infine gli investimenti rivolti ad attività di formazione del personale.

## 1.4: Industria 4.0 a supporto della crisi pandemica da Covid-19

La pandemia da Covid-19, che ha colpito l'intero panorama globale, ha causato una delle più grandi crisi economiche della storia recente, colpendo aziende di tutti i settori senza nessuna esclusione. Quest'ultime sono state quindi obbligate ad adattarsi alla situazione attuale per riuscire a tutelare i propri dipendenti e garantire la continuità della propria attività lavorativa. A seconda della natura e del settore di competenza dell'impresa ci sono state situazioni di interruzione improvvisa delle attività, causata dalla mancanza degli approvvigionamenti delle materie prime e dall'assenza dei propri dipendenti, costretti a rimanere a casa e lavorare il più possibile da remoto. Altre imprese invece sono state travolte da un improvviso picco di domanda, e hanno dovuto quindi rimodellare e aumentare l'efficienza dei propri sistemi di produzione.

In queste particolari situazioni, le tecnologie proposte da Industria 4.0 sono state necessarie e determinanti per la sopravvivenza delle imprese colpite dalla crisi pandemica. La pandemia da Covid-19 ha quindi contribuito alla diffusione di queste

tecnologie, facendo emergere i limiti e le difficoltà delle imprese nell'affrontare la trasformazione digitale.

Da un report presentato da McKinsey & Company, con il titolo "*Covid-19: An inflection point for Industry 4.0*", che riporta i risultati di una survey condotta su un campione di 400 aziende in tutto il mondo, finalizzata a comprendere quale sia stato il ruolo delle tecnologie dell'Industria 4.0 nella loro risposta alla pandemia, emerge la presenza di tre diversi scenari di riferimento. Nel primo scenario si trovano le imprese, definite precursori, che adottano soluzioni di Industria 4.0 già da diversi anni e che hanno risposto in maniera positiva agli effetti della crisi. Il secondo scenario invece, è rappresentato dalle aziende che all'inizio della pandemia si trovavano in fase di sperimentazione di alcune tecnologie; è stato necessario rivedere la metodologia di valutazione delle tecnologie impiegate, non più considerate come portatrici di valore aggiunto, ma per la loro utilità al verificarsi di situazioni estreme e inusuali. Inoltre, grazie alla possibilità di testare determinate tecnologie in questa situazione particolare, sono emersi i vari limiti e punti deboli sul quale lavorare in futuro.

Il terzo e ultimo scenario riguarda le aziende che hanno subito maggiori impatti dalla crisi pandemica, per via della loro completa inattività in termini di implementazione di tecnologie innovative. Hanno accusato l'assenza di esperienza e di infrastrutture IT adeguate, e a causa della scarsa disponibilità finanziaria e del momento poco favorevole, non sono riuscite ad effettuare nuovi investimenti mirati alla trasformazione digitale.

La situazione di difficoltà riscontrata dalle imprese colpite dalla crisi pandemica, può avere come risultato il rallentamento o la completa sospensione degli investimenti in essere per la trasformazione digitale.

Dall'analisi condotta dagli autori del report di McKinsey & Company, viene tuttavia sottolineato come la sospensione dei progetti di Industria 4.0, possa portare ad una situazione ancora più difficile da superare. Dunque, in questa situazione, le imprese devono investire e concentrare i propri sforzi ancor di più su questi temi, mirando alle

più importanti opportunità strategiche e puntando all'implementazione di soluzioni digitali che permettano di raggiungere un rapido scale-up.

# 2: Le tecnologie di Industria 4.0

Dopo aver delineato a livello cronologico l'avvento della quarta rivoluzione industriale, e aver fornito una panoramica generale sui programmi presentati dall'Unione Europea e dal governo italiano, nel seguente capitolo si entrerà nel dettaglio delle tecnologie proposte da Industria 4.0. Come anticipato dalle definizioni di Industria 4.0, gli elementi centrali sono i sistemi di produzione intelligenti, l'integrazione della fabbrica con l'intero ciclo vita del prodotto e con le attività collegate alla Supply Chain, e il miglioramento della qualità del lavoro delle persone.

L'industria 4.0 si basa sull'adozione di tecnologie digitali con la finalità di raccogliere dati in tempo reale e analizzarli, e fornendo informazioni preziose per il sistema di produzione. Ad esempio, grazie alla nascita dell'Internet of Things (IoT), dei servizi Cloud, dei Big Data e degli Analytics, è stato possibile creare il concetto di sistema cyber-fisico (CPS) dell'industria 4.0; temi che verranno approfonditi nei capitoli seguenti. Tuttavia, per via della complicata architettura tecnologica dei sistemi di produzione, risulta molto complesso definire un quadro completo delle tecnologie proposte da Industry 4.0 disponibili alle aziende manifatturiere.

In primo luogo, sarà delineata la distinzione tra le *Front-end technologies* dalle *Base technologies* con un'analisi della definizione teorica e dei casi d'uso più rilevanti. Successivamente la lista delle tecnologie sarà ridotta alle nove tecnologie ritenute abilitanti dal Ministero dello Sviluppo Economico - MISE.

## 2.1: Aree di competenza delle tecnologie I4.0

Basandosi sullo studio condotto da Alejandro Germàn Frank, Lucas Santos Dalenogare e Nestor Fabiàn Ayala, si può definire un quadro concettuale, rappresentato in Figura 5, strutturato su due livelli principali: tecnologie front-end e tecnologie di base. Le tecnologie front-end, dividono dimensionalmente Industria 4.0 in 4 parti principali: Smart Manufacturing, Smart Products, Smart Supply Chain e Smart Working; ciascuna delle quali rappresenta un sottoinsieme specifico di tecnologie. Le tecnologie di base, invece, considerano le tecnologie che permettono la connettività e l'intelligenza alle front-end technologies.

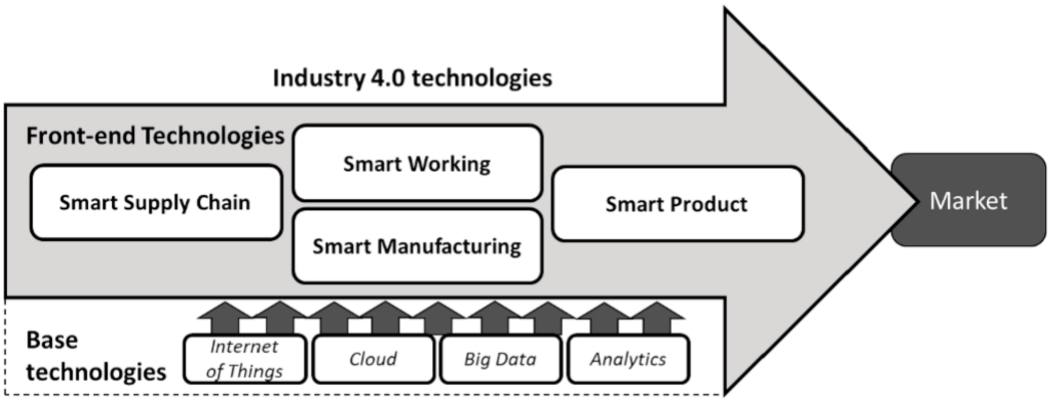


**Figura 5**: Framework riassuntivo delle tecnologie di Industria 4.0 suddivise per aree di intervento.

Considerando il framework proposto dai ricercatori sopracitati, si può notare come al centro si trovino le tecnologie front-end, le quali considerano la trasformazione delle attività manifatturiere basate sulle tecnologie emergenti (Smart Manufacturing) e la metodologia con cui i prodotti vengono offerti (Smart Product); di seguito sono prese in considerazione le dinamiche di approvvigionamento delle materie prime e la logistica in ingresso/uscita (Smart Supply Chain), per poi concludere con un focus sulle dinamiche con cui i lavoratori svolgono le proprie mansioni grazie alle emergenti tecnologie di supporto (Smart Working). La definizione di "tecnologie front-end" deriva

dal fatto che riguardano direttamente le esigenze operative e di mercato, con lo scopo di applicazione finale per la catena di valore delle aziende. L'elemento centrale tra le tecnologie front-end è lo Smart Manufacturing, mentre le altre tre unità sono interconnesse a questa.

Le tecnologie front-end si basano poi sulle tecnologie di base, che consistono in tecnologie che rendono possibile la connettività e l'intelligenza delle prime, consentendo il collegamento in un sistema di produzione completamente integrato. Le tecnologie di base sono coloro che definiscono e abilitano il concetto di Industria 4.0, differenziando la quarta rivoluzione industriale da quelle precedenti.

## 2.1.1: Front-End Technologies

### *2.1.1.1: Smart Manufacturing*

Il punto centrale del concetto di Industria 4.0, a livello di attività operative interne alla fabbrica, sono le tecnologie Smart Manufacturing. Esse considerano le tecnologie per la lavorazione del prodotto, e quindi all'interno del sistema di produzione, perciò consideriamo lo Smart Manufacturing come il punto di partenza di Industria 4.0, che vedrà nello Smart Product la sua estensione, analizzata successivamente.

Sempre secondo il modello proposto da *Frank*, *Dalenogare* e *Ayala*, e come riassunto in Figura 6, consideriamo le tecnologie dello Smart Manufacturing suddividendole in sei categorie e in base al loro scopo principale: integrazione verticale, virtualizzazione, automazione, tracciabilità, flessibilità e gestione dell'energia.

| Categorie | Tecnologie per lo Smart Manufacturing |
|---|---|
| **Integrazione verticale** | - Sensori<br>- Attuatori e controllori logici programmabili (PLC)<br>- Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)<br>- Manufacturing Execution System (MES)<br>- Enterprise Resource Planning (ERP)<br>- Comunicazione machine-to-machine (M2M) |
| **Virtualizzazione** | - Messa in servizio virtuale<br>- Simulazione dei processi (es: produzione digitale)<br>- Intelligenza artificiale per la manutenzione predittiva<br>- Intelligenza artificiale per la pianificazione della produzione |
| **Automazione** | - Comunicazione machine-to-machine (M2M)<br>- Robot (es: robot industriali, veicoli a guida autonoma)<br>- Identificazione automatica delle non-conformità nella produzione |
| **Tracciabilità** | - Identificazione e tracciabilità delle materie prime<br>- Identificazione e tracciabilità dei prodotti finiti |
| **Flessibilità** | - Additive manufacturing<br>- Linee flessibili e autonome |
| **Gestione dell'energia** | - Sistema di monitoraggio dell'efficienza energetica<br>- Sistema di miglioramento dell'efficienza energetica |

**Figura 6:** Tabella riassuntiva delle tecnologie per lo Smart Manufacturing.

L'**integrazione verticale** comprende i sistemi ICT avanzati che integrano tutti i livelli gerarchici dell'azienda, partendo dall'officina, ai livelli intermedi e superiori, cercando di semplificare le azioni decisionali e diminuendo i margini di errore. Per fare in modo di ottenere un'azienda integrata verticalmente, è necessario in primo luogo digitalizzare tutti gli oggetti fisici presenti in officina attraverso l'inserimento di sensori, attuatori, e controllori logici programmabili, ovvero i PLC. Lo step successivo consiste nella raccolta di dati ottenuta dal Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), utilizzati poi per il controllo e per la gestione della produzione. Infine, i sistemi di esecuzione della produzione (MES), ricevono i dati da SCADA, e forniscono informazioni e aggiornamenti sullo stato della produzione all'Enterprise Resource Planning (ERP). Una volta che si ottiene la completa integrazione dei sistemi elencati, anche le informazioni riguardanti gli ordini di produzione fluiscono in maniera

differente, ovvero downstream, partendo da ERP, per arrivare a MES e quindi a SCADA, aiutando le risorse aziendali sulla gestione della produzione. Il grande vantaggio derivante dall'integrazione verticale in azienda consiste in maggiore trasparenza e controllo del processo di produzione, stimolando il miglioramento dei processi decisionali degli operatori in officina.

Per raggiungere questo, esiste inoltre la comunicazione machine-to-machine (M2M), tecnologia che consiste in un sistema di comunicazione che rende le macchine presenti nel reparto della produzione, capaci di collegarsi in rete, facilitando il loro adattamento nelle differenti linee di produzione.

La seconda categoria di tecnologie dello Smart Manufacturing riguarda la **Virtualizzazione**: resa possibile dalle comunicazioni M2M, grazie alla messa in servizio virtuale, si riescono a ridurre notevolmente i tempi di inattività prolungati a causa della lunga configurazione delle apparecchiature. Nella virtualizzazione rientrano anche la simulazione dei processi, ovvero la Produzione Digitale, che gode di un grande supporto da parte dell'implementazione dell'Intelligenza Artificiale. Nelle macchine, grazie alla presenza di strumenti analitici avanzati, si possono analizzare i dati raccolti dai sensori per monitorare e prevedere eventuali guasti, sovraccarichi, o problemi di altra natura. Tutto questo rende possibile la manutenzione predittiva, che aiuta a ridurre i tempi di fermo dovuti a guasti imprevisti che avvengono durante il processo di produzione. I macchinari dotati di intelligenza artificiale possono anche identificare, in maniera automatica e fin dalle prime fasi del processo di produzione, eventuali prodotti non conformi a specifiche, aumentando così la qualità e riducendo sprechi e costi di produzione. Infine, sempre parlando di Intelligenza Artificiale, è possibile l'integrazione con i sistemi ERP, riuscendo a prevenire eventuali richieste di produzione a lungo termine trasformandole in ordini di produzione giornaliera.

Il terzo gruppo di tecnologie analizzate riguarda l'**Automazione**, caratterizzata dalla presenza di Robot che riescono ad eseguire le attività con maggiore precisione rispetto

al passato e aumentarne la produttività, e a identificare automaticamente le eventuali non conformità nella produzione.

Con la **tracciabilità** si apre la quarta categoria di tecnologie, la quale consiste principalmente nell'identificazione e nella tracciabilità delle materie prime e dei prodotti finali. Per la tracciabilità interna i sensori vengono applicati direttamente alle materie prime e nei prodotti finiti, permettendo il controllo ottimizzato dell'inventario disponibile all'interno della fabbrica. Un ulteriore applicazione della tracciabilità interna si presenta nelle linee flessibili di produzione, appartenenti al quinto gruppo di tecnologie per la **Flessibilità** proposte dallo Smart Manufacturing di Industria 4.0, le quali possono essere costruite utilizzando macchinari modulari che leggono i requisiti necessari dei prodotti direttamente dai sensori incorporati, e vanno ad eseguire solamente le azioni necessarie per la loro lavorazione; questo è molto importante quando si parla di personalizzazione dei prodotti o di ampie gamme di prodotti, poiché permette di produrre diversi tipi di prodotti in lotti di piccole dimensioni, senza andare a diminuire la produttività. Oltre alle linee flessibili e autonome di produzione, nel gruppo di tecnologie che mirano alla flessibilità, si trova anche l'Additive Manufacturing, che utilizza la stampa 3D di modelli digitali che hanno la possibilità di essere modificati per la personalizzazione del prodotto finito, utilizzando le stesse risorse per produrre beni differenti; non ultimo il vantaggio della sostenibilità per via del minor numero di rifiuti generati rispetto alla produzione tradizionale. Tuttavia, nella produzione su larga scala, l'uso dell'Additive Manufacturing risulta ancora rallentato per via della sua minore velocità di produzione.

Infine, l'ultimo gruppo di tecnologie proposte consiste nella **Gestione dell'Energia**, mirata ad aumentare l'efficienza della fabbrica: sistemi di monitoraggio e miglioramento dell'efficienza energetica. Il primo consiste nella continua raccolta di dati riguardanti il consumo di energia elettrica, mentre il secondo consiste nel suo miglioramento attraverso sistemi intelligenti per la gestione dell'energia, che spesso

sviluppano una programmazione della produzione più intensiva nelle fasce orarie con tariffe dell'energia elettriche meno costose.

### *2.1.1.2: Smart Product*

Con il termine Smart Product, ovvero "prodotto intelligente", si considera il valore aggiunto esterno dei prodotti, che si concretizza nel momento in cui c'è la possibilità di collezionare informazioni e dati dei clienti in maniera integrata con il sistema produttivo, da utilizzare per poterne migliorare le caratteristiche di prodotto e gli eventuali consumi.

Mentre lo Smart Manufacturing si concentra sulle tecnologie utilizzate per la lavorazione del prodotto e sul sistema di produzione, lo Smart Product considera le tecnologie legate direttamente all'offerta del prodotto, quindi lato *Cliente*.

Le tecnologie front-end per gli Smart Product, riassunte nella tabella in Figura 7, prevedono delle componenti intelligenti che abilitano capacità e servizi digitali:

| Categorie | Tecnologie per lo Smart Product |
|---|---|
| **Opportunità derivanti dagli Smart Connected Product** | - Connettività del prodotto<br>- Monitoraggio del prodotto<br>- Controllo del prodotto<br>- Ottimizzazione del prodotto<br>- Autonomia del prodotto |

**Figura 7**: Tabella riassuntiva delle tecnologie per lo Smart Product.

Grazie alla sensoristica integrata direttamente nei prodotti finiti, come anticipato nello Smart Manufacturing, è possibile realizzare la connettività dei prodotti stessi in una rete con altri oggetti o sistemi. I sensori permettono di eseguire il monitoraggio dei prodotti fisici, di controllare la condizione del prodotto e i parametri di utilizzo: punto di forza

molto importante soprattutto agli occhi dei clienti. Infatti, i prodotti che montano software integrati, direttamente connessi al Cloud, possono essere monitorati e controllati tramite delle interfacce remote digitali, ottimizzati mediante la presenza di algoritmi analitici che servono per la diagnostica predittiva e per informare su eventuali correzioni da mettere in pratica dal cliente finale. Grazie all'Intelligenza artificiale poi, i prodotti possono arrivare ad una ottimizzazione autonoma.

Un altro importante vantaggio degli Smart Product è rappresentato dalla possibilità, da parte del produttore, di avere informazioni utili dal monitoraggio dei prodotti dopo la vendita, attraverso cui può condurre analisi approfondite sui modelli di utilizzo del prodotto, sulla segmentazione del mercato e sullo sviluppo di nuovi prodotti.

#### *2.1.1.3: Smart Supply-Chain*

Il terzo gruppo di tecnologie front-end proposto da Industria 4.0, viene denominato Smart Supply Chain. Diversamente dallo Smart Manufacturing e dallo Smart Product, che hanno come obiettivo principale quello di aggiungere valore alla produzione e ai prodotti finiti, lo Smart Supply Chain, così come lo Smart Working analizzato in seguito, ha lo scopo di aumentare l'efficienza delle attività operative al di fuori dell'azienda.

Le principali tecnologie riguardanti lo Smart Supply Chain, supportano tipicamente l'integrazione orizzontale della fabbrica con i fornitori esterni, con l'obiettivo di migliorare la logistica in ingresso e in uscita delle materie prime e dei prodotti finiti, e di conseguenza i costi operativi e i tempi di consegna previsti.

L'integrazione orizzontale permette di realizzare in tempo reale lo scambio di informazioni riguardanti gli ordini di produzione, sia con i fornitori che con i centri di distribuzione. Per questi ultimi, infatti, grazie alla presenza delle piattaforme digitali, sarà semplice accedere a qualsiasi informazione necessaria che si trovi sul Cloud.

Inoltre, è possibile monitorare e controllare da remoto la tracciabilità delle merci, garantendo l'ottimizzazione dei magazzini e l'eventuale tempestività nel servizio da parte dei fornitori, grazie alla condivisione di dati e alla comunicazione in tempo reale. Un altro beneficio molto importante riguarda la capacità di mitigare gli eventi che comportano un rischio, ad esempio: la presenza di piattaforme digitali con capacità analitiche collegate direttamente con piattaforme per la previsione delle condizioni metereologiche, permette di evitare eventuali ritardi nelle consegne e ridurre il disservizio causato.

Infine, sempre attraverso le piattaforme digitali, è possibile migliorare e rafforzare la customer relationship, monitorando in tempo reale la consegna dei prodotti e rispondendo ad eventuali richieste specifiche dei clienti.

Le piattaforme digitali possono servire non solo a livello di singola fabbrica, ma possono integrare tra loro diversi stabilimenti appartenenti ad un'unica impresa, permettendo la condivisione di informazioni interne riguardanti tipicamente le attività operative, il tutto controllato da investimenti specifici in cyber-security, tema approfondito nei capitoli seguenti.

Quindi, per concludere, le tecnologie proposte per la Smart Supply Chain, sono riassunte nella tabella presente in Figura 8:

| Categorie | Tecnologie per lo Smart Supply Chain |
|---|---|
| **Piattaforme digitali** | - Piattaforme digitali integrate con i fornitori<br>- Piattaforme digitali integrate con i clienti<br>- Piattaforme digitali integrate con le altre aziende |

**Figura 8**: Tabella riassuntiva delle tecnologie per lo Smart Supply Chain.

### *2.1.1.4: Smart Working*

L'ultima famiglia di tecnologie front-end è quella dello Smart Working, il quale come anticipato, nasce per migliorare l'efficienza delle attività operative, in particolare supportando le attività dei lavoratori, fornendo loro condizioni di lavoro migliori per renderli più produttivi e flessibili sui requisiti del sistema di produzione.

Lo Smart Working, come la Smart Supply Chain, è considerato come una tecnologia front-end poiché ha un impatto determinante direttamente sulle performance operative dell'azienda.

Questo dimostra come la visione di Industria 4.0 sia fondata direttamente sull'integrazione tra l'uomo e la macchina.

Le tecnologie proposte nello Smart Working sono rappresentate nella tabella seguente:

| Categorie | Tecnologie per lo Smart Working |
|---|---|
| **Tecnologie a servizio dei lavoratori** | - Monitoraggio da remoto della produzione<br>- Attività operative svolte da remoto<br>- Realtà aumentata per la manutenzione<br>- Realtà virtuale per la formazione dei lavoratori<br>- Realtà aumentata e virtuale per lo sviluppo prodotto<br>- Robot collaborativi |

**Figura 9***:* Tabella riassuntiva delle tecnologie per lo Smart Working

Grazie alle tecnologie affrontate nei punti precedenti, ovvero le piattaforme digitali, è possibile effettuare il monitoraggio da remoto della produzione, il quale permette di avere accesso a qualsiasi tipo di informazione riguardante la produzione in officina, in qualunque istante. Inoltre, con la possibilità di svolgere da remoto le attività operative tramite dispositivi mobili, è possibile migliorare i processi decisionali dei lavoratori e aumentare notevolmente la visibilità delle informazioni riguardanti il processo in corso.

La seconda parte importante delle tecnologie riguardanti lo Smart Working è quella degli strumenti virtuali, messi a supporto dei lavoratori per i processi decisionali: realtà aumentata e realtà virtuale creano ambienti virtuali parziali e completi.

La realtà virtuale trova notevoli applicazioni nella manutenzione, in quanto riesce ad accelerare la formazione dei lavoratori attraverso delle simulazioni immersive riguardanti le routine quotidiane di manutenzione. La realtà aumentata invece, aiuta i lavoratori in tempo reale attraverso una guida interattiva, che illustra le istruzioni e i passaggi necessari da completare.

Per concludere, i robot collaborativi interagiscono con i lavori per supportare le attività in termini di precisione, affidabilità, efficienza e forza, senza nuocere alla flessibilità del lavoro umano. L'obiettivo principale dell'introduzione dei robot collaborativi è quello di diminuire al massimo le attività che danno un basso valore aggiunto ai prodotti svolte dai lavoratori, sostituendoli con i robot, per poi sfruttare il potenziale e le capacità dei lavoratori per attività più complesse e dove conta il fattore discrezionale.

## 2.1.2: Base Technologies

Le tecnologie di base proposte da Industria 4.0, che in quanto tali supportano le tecnologie front-end analizzate nei punti precedenti, sono caratterizzate principalmente dalle cosiddette "New ICT". L'ICT, Information Communication Technology, è la scienza che studia in modo integrato i sistemi di elaborazione, trasformazione e trasmissione dell'informazione. Le più importanti sono rispettivamente:

- Internet of Things (IoT);
- Servizi Cloud;
- Big Data;
- Analytics.

Queste tecnologie sono essenziali e rendono possibile l'interconnessione e l'aspetto intelligente dei nuovi sistemi di produzione proposti da Industria 4.0.
Analizzandole nel dettaglio:

- **IoT - Internet of Things** - consiste nell'integrare sensori e computer direttamente sui macchinari, sulle linee di produzione o direttamente sulle materie prime, attraverso la comunicazione wireless, grazie ad una connessione Internet. Negli ultimi anni tutto questo è stato semplificato dai recenti progressi in Internet e dalla riduzione dei costi della sensoristica, che hanno reso possibile il rilevamento di qualsiasi tipo di oggetto e la loro connessione in una rete più ampia.

- **Servizi Cloud** - Grazie ai servizi Cloud è possibile ottenere l'accesso ad una mole di dati e risorse di calcolo interne all'azienda. Questa tecnologia permette di memorizzare i dati in un server centrale, i quali possono poi essere facilmente consultati e modificati direttamente da remoto. L'elemento vincente dei servizi Cloud consiste nel facilitare notevolmente l'integrazione di dispositivi differenti, in

quanto non hanno più la necessità di essere disposti nelle vicinanze ma possono comunque condividere informazioni tra loro.

- **Big Data** - consistono nella raccolta di una grande mole di dati direttamente da diversi sistemi e oggetti, come ad esempio eventuali letture provenienti da sensori; il tutto reso possibile dalla combinazione di IoT e servizi cloud. È importante sottolineare come i Big Data siano la base di partenza per la creazione dei Digital Twin, che verranno trattati successivamente.

- **Analytics** - ovvero la capacità di analisi attraverso tecniche avanzate, tipicamente considerati come l'elemento fondamentale della quarta rivoluzione industriale poiché permettono l'introduzione di concetti fondanti, come la capacità predittiva di identificare eventi che possono influenzare la produzione prima che essi si verifichino, basandosi sui dati storici raccolti. Insieme ai Big Data, gli analytics rappresentano un grande elemento di supporto per la gestione automatizzata delle diverse linee di produzione e per supportare le attività decisionali grazie agli algoritmi di ottimizzazione.

Per concludere, Big Data e Analytics sono considerate tecnologie chiave per qualsiasi tipo di applicazione avanzata proposta da Industria 4.0, per il fatto che l'intelligenza dei sistemi produttivi dipende dalla grande quantità di dati accumulati (Big Data) e dalla capacità di analisi e di calcolo attraverso tecniche avanzate (analytics).

## 2.2: Tecnologie abilitanti

Dopo una prima analisi delle tecnologie proposte da Industria 4.0, dividendole nelle famiglie delle tecnologie front-end e delle tecnologie di base, in accordo con la suddivisione proposta da *Frank*, *Dalenogare* e *Ayala*, e prima di entrare nel merito della ricerca sviluppata, nel seguente capitolo queste tecnologie verranno selezionate per arrivare alle 9 tecnologie definite abilitanti, da Boston Consulting Group e successivamente dal Ministero dello Sviluppo Economico - MISE, nel Piano Nazionale "Impresa 4.0".

Le *tecnologie abilitanti*, o *KETs* (Key Enable Technologies), per definizione sono basate sull'interconnessione tra loro e con la rete Internet di diversi strumenti, dispositivi e risorse. Permettono alle imprese di migliorare i loro processi in termini di efficienza e qualità, e creare valore aggiunto, elemento ormai fondamentale per riuscire a generare vantaggio competitivo rispetto alla concorrenza. Possono inoltre essere considerate dei driver di innovazione poiché il loro ruolo diventa essenziale quanto si parla di processi di digital transformation.

Come analizzato nei capitoli precedenti, le tecnologie abilitanti hanno un impatto positivo anche nella logistica di un'impresa, poiché grazie all'integrazione dei dati dei sistemi di produzione, è possibile sincronizzare le aziende con il resto degli attori presenti nella filiera produttiva.

Il Ministero dello Sviluppo Economico (MISE), nel Piano Nazionale Industria 4.0, presenta un elenco di nove tecnologie riconosciute come abilitanti, tuttavia è bene ricordare che è sbagliato considerare queste tecnologie come un gruppo chiuso poiché si tratta di sistemi in continua evoluzione. Le principali tecnologie abilitanti proposte, visibili in Figura 10, sono rispettivamente: Advanced Manufacturing Solutions, Additive Manufacturing, Augmented Reality, Simulations, Horizontal and Vertical integration, Industrial Internet, Cloud, Cyber-security e Big Data Analytics.

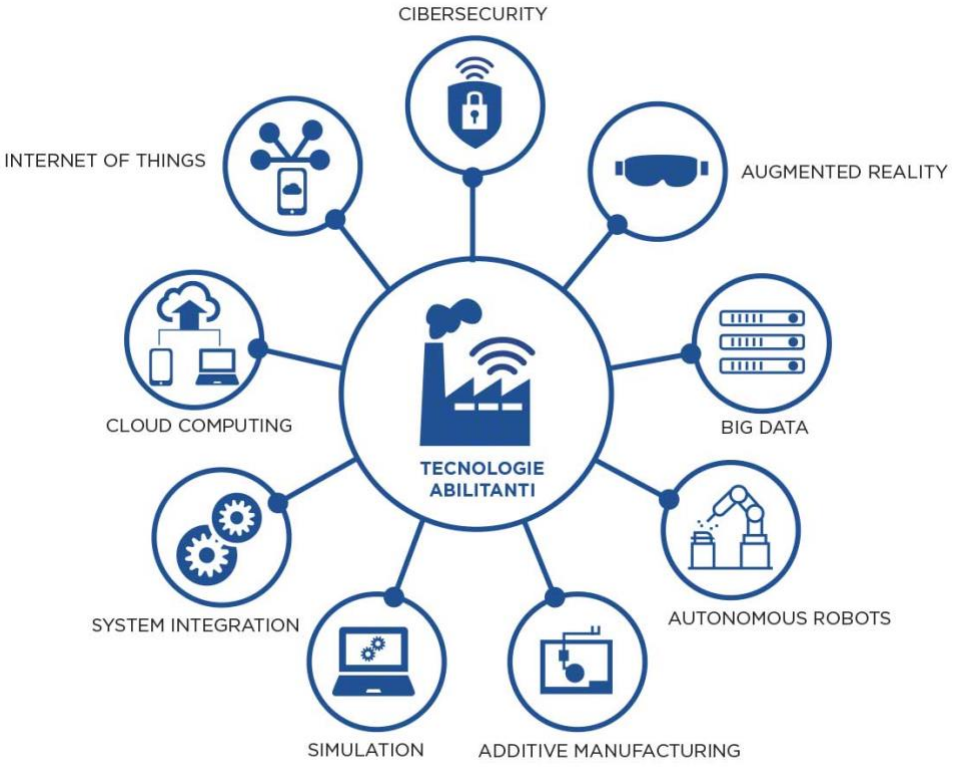


**Figura 10**: Le nove tecnologie abilitanti del MISE.

## 2.2.1: Advanced Manufacturing Solutions

Si tratta principalmente dei Robots, collaborativi o autonomi, con le caratteristiche di essere interconnessi e integrati con le linee produttive, rapidamente programmabili, sempre più precisi e in grado di collaborare con gli operatori. Sono utilizzati da tempo in molti settori industriali per svolgere compiti complessi, tuttavia sono in continua evoluzione e diventano sempre più autonomi, flessibili e cooperativi; se vengono interconnessi con software e impianti possono essere utilizzati nelle fasi produttive, nella movimentazione automatica di merci e addirittura in diverse fasi di picking, adattandosi in maniera intelligente al flusso del materiale della linea di produzione in cui sono allocati. Ad esempio, i Robot mobili autonomi o AMR (Autonomous Mobile Robots), sono dispositivi che hanno la capacità di completare diverse attività e di

spostarsi autonomamente all'interno di un magazzino o stabilimento produttivo, grazie alla presenza di sensori avanzati, software di intelligenza artificiale e mappatura geografica. Questa tipologia di robot vede le maggiori applicazioni in ambito logistico, per la movimentazione delle merci.

**Figura 11:** Un esempio di Robot Autonomo, comandato direttamente dall'operatore che monitora i processi a bordo macchina.

## 2.2.2: Additive Manufacturing

Con il termine Additive Manufacturing ci si riferisce tipicamente alla stampa tridimensionale (3D) e alle differenti tecniche e tecnologie legate ad essa, utilizzata principalmente per la prototipazione e la produzione di singoli componenti. I principali vantaggi di questa tecnologia sono: riduzione del tempo di progettazione e del costo delle materie prime, possibilità di produrre piccoli lotti di prodotti personalizzati, miglioramento nella gestione delle risorse, a livello logistico può portare ad una riduzione di scorte a magazzino dei prodotti a bassa rotazione e conseguente riduzione dei costi di stoccaggio. La stampa 3D viene utilizzata spesso in ambito aerospaziale per studiare nuovi design che riducono il peso degli aeromobili, abbassando notevolmente il costo delle materie prime come il titanio.

## 2.2.3: Augmented Reality

La realtà aumentata (AR) permette di arricchire la realtà che circonda i lavoratori con una serie di informazioni rilevanti in tempo reale per migliorare il processo decisionale e le procedure di lavoro, attraverso alcuni dispositivi di diverso genere (ad esempio: visori indossabili, tablet, smartphone etc. etc.). Una delle applicazioni più importanti riguarda l'ambito manutentivo, dove i lavoratori ricevono istruzioni di riparazione sul come sostituire un particolare componente mentre osservano il sistema che necessita di riparazione; queste informazioni possono essere visualizzate direttamente nel campo visivo dei lavoratori utilizzando determinati dispositivi come i visori o gli occhiali per la realtà aumentata. Un altro ambito di applicazione è quello della logistica: la realtà aumentata può migliorare notevolmente la precisione del picking e la verifica degli ordini ricevuti dal magazzino, più dinamica e accurata.

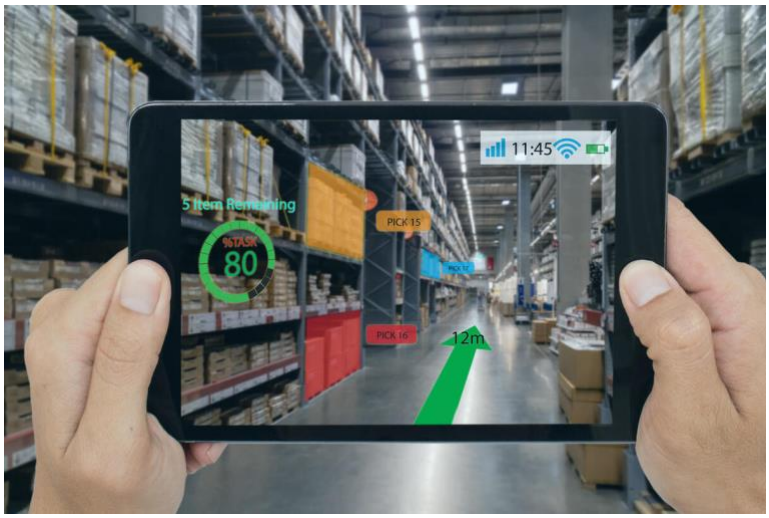


**Figura 12:** Esempio di applicazione della realtà aumentata, all'interno della gestione di un magazzino e della fase di picking.

## 2.2.4: Simulations

La simulazione, denominata anche Digital Twin o gemello digitale, è la esatta copia digitale di un processo, prodotto o servizio, che si ottiene direttamente dalle informazioni inviate dai sensori installati nei sistemi di produzione o nei centri logistici. Questa trasformazione da reale a virtuale che avviene in tempo reale, permette alle imprese di eseguire test, simulare e ottimizzare le impostazioni dei macchinari prima del passaggio fisico, riducendo così i tempi di setup della macchina e aumentando la qualità del prodotto finito. La simulazione, come anticipato nei capitoli precedenti, è realizzata attraverso l'implementazione dell'IoT, del Cloud e dei Big Data. Il vantaggio principale del Digital Twin, una delle tecnologie protagoniste della quarta rivoluzione industriale, è quello di permettere di simulare le strategie proposte dal top management ed implementare eventuali azioni correttive senza costi aggiuntivi o perdite di tempo utile per la produzione.

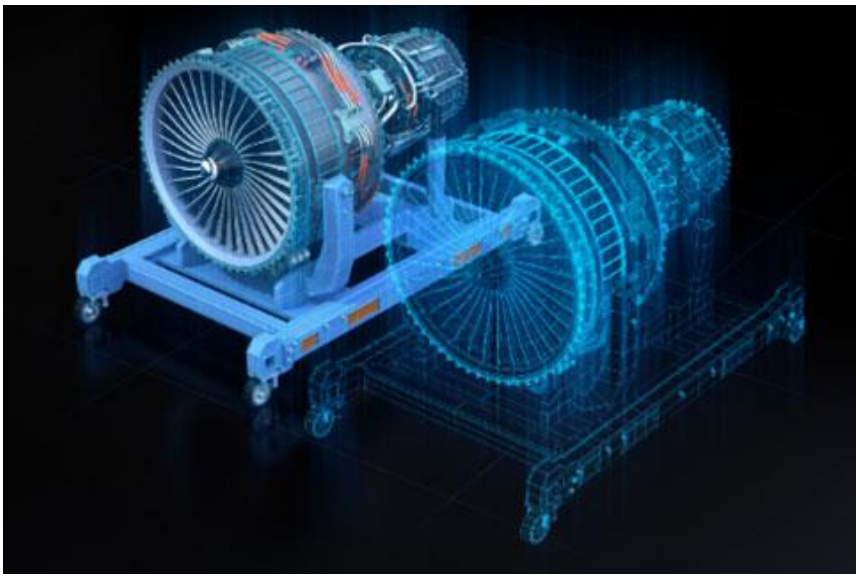

**Figura 13:** Sviluppo del gemello digitale di un motore di un aereoplano.

## 2.2.5: Horizontal and Vertical integration

Affrontando il tema delle tecnologie abilitanti, il concetto chiave è sicuramente quello dell'integrazione. L'integrazione verticale, analizzata nelle tecnologie front-end nel Capitolo 2.1.1.1, rende possibile l'interazione di tutti i livelli gerarchici presenti in azienda, fornendo da supporto per le attività decisionali e strategiche. Mentre con l'integrazione orizzontale, ovvero con la Supply Chain in cui si trova l'azienda, si riescono a ridurre notevolmente le inefficienze e a migliorare i flussi di lavoro. Come anticipato, l'integrazione Verticale e Orizzontale di un'azienda è possibile solamente con la digitalizzazione di tutti gli oggetti presenti attraverso sensori, attuatori e PLC.

**Figura 14:** Integrazione verticale e orizzontale nell'Industria 4.0.

## 2.2.6: Internet of Things (IoT)

L'Internet of Things (IoT), analizzato nelle tecnologie di Base nel capitolo 2.1.2, ovvero i dispositivi e sensori capaci di dialogare reciprocamente, vengono applicati in ambito industriale e si trasformano in IIoT: Industrial Internet of Things. Grazie a questa particolare architettura della comunicazione, si è ottenuta una trasmissione rapida e molto efficiente della grande quantità di dati proveniente da tutti i sensori e attuatori installati in azienda. Questa trasformazione rappresenta un'importante opportunità per i manager delle aziende di riuscire ad accedere, con grande facilità e rapidità, ad una grande quantità di informazioni. Queste informazioni poi serviranno da supporto per le decisioni operative e strategiche delle imprese.

L'IIoT comporta grandi vantaggi in ambito logistico: ruolo essenziale nelle operazioni di manutenzione predittiva degli impianti e dei sistemi, permettono una gestione più efficiente e soprattutto data-driven delle scorte, ottimizzano la logistica interna grazie alla migliore tracciabilità dei materiali e dei prodotti, e monitorano la qualità e la sicurezza delle operazioni interne.

Bosch Rexroth, ad esempio, è un'azienda che fornisce sistemi di azionamento e controllo. Negli anni ha costruito un impianto per la produzione di valvole con un processo di produzione semiautomatizzato e decentralizzato: i prodotti sono identificati con dei codici di identificazione a radiofrequenza e le stazioni di lavoro sanno sempre quali operazioni devono essere svolte su ogni tipologia di prodotto diverso, garantendo efficienza e flessibilità della linea di produzione. Tutto questo reso possibile grazie all'IIoT.

## 2.2.7: Cloud Computing

Il Cloud computing è una tecnologia che migliora notevolmente i processi aziendali e che prevede l'accesso ai dati attraverso il browser internet, basandosi sulla grande flessibilità offerta dal Cloud. Ovviamente con l'avvento di Industria 4.0, sempre più attività legate alla produzione richiedono una maggiore condivisione di dati tra i vari reparti di uno stabilimento e tra stabilimenti diversi, per questo motivo il Cloud diventa sempre più importante.
Inolte, grazie all'avvento del Cloud e del Cloud Computing, per le aziende è aumentata negli anni la possibilità di fare outsourcing di processi informatici complessi, potendo quindi investire maggiormente sul tema dell'analisi dei dati e del loro utilizzo piuttosto che investire nella costruzione e nella gestione delle proprie architetture informatiche.

## 2.2.8: Cyber-security

Al giorno d'oggi, molte PMI del panorama industriale, si affidano ancora a sistemi di gestione e sistemi di produzione non collegati o chiusi. Con l'avvento di Industria 4.0 e con le sue tecnologie abilitanti, si mira ad una maggiore integrazione rispetto al resto degli attori della Supply Chain attraverso dei protocolli di comunicazione tipicamente standard. Questa apertura verso il mondo esterno obbliga le aziende ad essere più attente e ad effettuare maggiori controlli riguardo alla protezione dei propri dati e ad eventuali attacchi informatici. Con l'ingresso, negli stabilimenti, di una grande quantità di sensori, robot, sistemi automatici e via dicendo, l'investire in cyber-security è diventata una condizione necessaria per la tutela della sicurezza dei sistemi e dei dati.

### 2.2.9: Big Data Analytics

Infine, l'ultima delle tecnologie abilitanti di Industria 4.0, è quella dell'analisi dei Big Data. Come anticipato nel Capitolo 2.1.2 sulle Tecnologie di Base, i Big Data consistono nella raccolta di una grande mole di dati direttamente da diversi sistemi e oggetti, come ad esempio eventuali letture provenienti da sensori; il tutto reso possibile dalla combinazione di IoT e servizi Cloud. Una volta immagazzinata questa grande mole di dati, serviranno tecnologie dedicate alla loro analisi e interpretazione. Le aziende in grado di costruire sistemi capaci di raccogliere, processare e strutturare i dati in KPI misurabili e confrontabili, guadagneranno un notevole vantaggio competitivo e saranno in grado di adattarsi all'andamento dei mercati. Tuttavia, come verrà dimostrato nei capitoli seguenti, non basta solamente avere dei sistemi strutturati, poiché ciò che serve è la presenza di figure professionali altamente qualificate ed esperte nel settore, che sappiano sfruttare al meglio i dati raccolti.
Oltre al supporto per le fasi decisionali, i Big Data Analytics rappresentano un notevole vantaggio per la gestione e il controllo della qualità; possono per esempio limitare gli scarti di prodotti finiti rilevano anomalie di prodotto fin dalle prime fasi di produzione, diminuendo quindi i costi totali di produzione.

## 2.3: Alcuni benefici delle tecnologie I4.0

Le tecnologie abilitanti, o KETs, possono essere quindi considerate "l'asse attorno al quale ruota la quarta rivoluzione industriale", poiché consentono alle imprese di essere più flessibili, produttive, più sicure per i lavoratori e più sostenibili per l'ambiente. Nei capitoli seguenti verranno approfonditi con maggiore attenzione questi ultimi due benefici.

### 2.3.1: Sicurezza

Come anticipato nei capitoli precedenti, l'avvento e la diffusione della tecnologia hanno avuto un notevole impatto sulle condizioni di salute e di sicurezza sul lavoro. Come primo esempio si possono considerare i Robot, che sono andati a sostituire i lavoratori nelle operazioni più pericolose, oppure gli esoscheletri, grazie ai quali c'è stata una notevole riduzione dello stress fisico sugli operatori. Inoltre, grazie all'interfaccia uomo-macchina realizzata dalle tecnologie abilitanti menzionate, emerge la grande riduzione di errori e di incidenti sul lavoro. Tuttavia, non sono solamente i processi produttivi che hanno ricevuto questi benefici, ma anche i bisogni dei lavoratori e i rischi per la loro salute; infatti, anche gli spazi di lavoro cambiano sempre di più, grazie al fatto di poter compiere determinate professioni da remoto, all'utilizzo sempre più diffuso delle piattaforme e di altri strumenti di smart working. Come conseguenza cambia anche il significato stesso della salute del lavoratore: non si tratta più soltanto di infortunio e malattia professionale inteso in senso fisico, ma bisogna tenere in considerazione anche l'aspetto psicologico. Questo argomento è sempre più attuale anche a causa delle recenti misure di contenimento della pandemia da Covid-19, dove il lavoro da remoto ha preso sempre più piede e ha portato alla luce notevoli sfide per la salute mentale dei lavoratori. La disconnessione delle tecnologie diventa quindi un diritto del lavoratore e le normative a tutela della salute dovranno riguardare anche questo aspetto.

Come anticipato, il tema della sicurezza ha subito un cambiamento non solo per l'introduzione degli ambienti di lavoro da remoto, ma anche direttamente negli spazi fisici: è importante sottolineare come le tecnologie dell'automazione industriale, attraverso i robot autonomi e i robot collaborativi, abbiano ridotto notevolmente i rischi legati allo svolgimento di operazioni pericolose per gli operatori, ma non bisogna dimenticare eventuali rischi associati all'utilizzo di macchine che operano sempre più

in autonomia, variando il loro comportamento all'interno dell'ambiente di lavoro senza l'intervento gli operatori.

Da quest'ultimo aspetto deriva la possibilità che si verifichino delle ripercussioni psicologiche, derivanti dalla presenza di queste tecnologie, come ad esempio la paura degli operatori di essere licenziati e sostituiti, oppure l'impatto negativo sulla determinazione e sulla motivazione personale dei lavoratori.

Tuttavia, è molto importante ricordare la complessità degli ambienti di lavoro proposti da Industria 4.0, di conseguenza i processi decisionali non possono essere strutturati unicamente sulle tecnologie. L'esperienza del lavoratore, a questo punto, diventa sempre più importante e decisiva per ottenere risultati.

Questo fenomeno va quindi visto con un approccio antropocentrico alla produzione, ovvero bisogna considerare la tecnologia non come sostituta dell'uomo, ma come uno strumento che arricchisce la conoscenza dell'uomo attraverso il flusso di informazioni sempre più attendibili e precise, e che lo guida nei processi decisionali, migliorandoli significativamente.

La grande sfida da affrontare, sul tema di sicurezza sul lavoro e tutela della salute del lavoratore, riguarda il considerare il sistema di produzione in un'ottica di cura della persona, senza trascurare tutti i cambiamenti introdotti dalla quarta rivoluzione industriale e il loro effetto sulle relazioni uomo-macchina sia all'interno che all'esterno degli ambienti di lavoro.

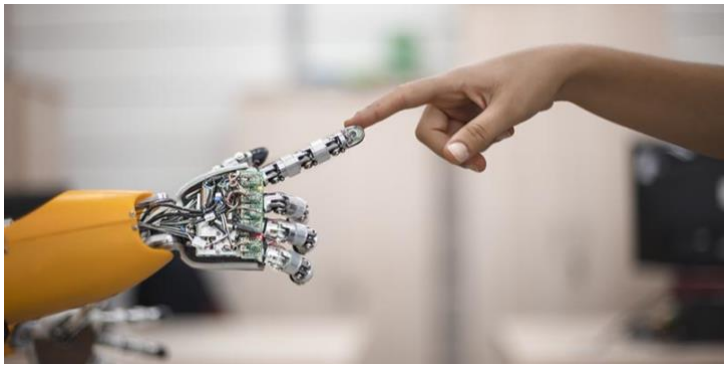

**Figura 15**: Raffigurazione dell'aspetto sinergico presente tra le tecnologie e l'uomo.

## 2.3.2: Sostenibilità ambientale

Un altro grande beneficio degno di nota, riguarda la Sostenibilità ambientale, spinta dalla diffusione del concetto di Economia Circolare: le tecnologie abilitanti non si limitano all'impatto sull' operatività delle imprese, ma grazie ad esse emerge un notevole abbattimento dei consumi legati alla logistica interna ed esterna, consumi energetici dei macchinari negli stabilimenti produttivi, consumi di materie prime scartate grazie alla riduzione degli sprechi e di conseguenza una riduzione dei rifiuti da smaltire. Può quindi essere definito un modello green, con un impatto notevole sul fatturato.

### *2.3.2.1: Economia circolare*

L'Economia Circolare rappresenta il più nuovo e recente paradigma economico emergente, tale da poter sostituire i modelli produttivi basati sull'ottica Lean, puntando ad una radicale riduzione degli sprechi e ad un ripensamento della concezione dei prodotti, e il loro uso nel tempo. Nella pagina seguente, in Figura 16, è rappresentato uno schema riassuntivo del passaggio dal concetto di Lean Production all'Economia Circolare

Questo rappresenta, come anticipato, una grande rivoluzione per i sistemi produttivi e per la società, poiché mette al centro attività e processi di produzione e di consumo sostenibili, con particolare attenzione alla gestione delle risorse disponibili che dovrà essere svolta in maniera consapevole e il più efficiente possibile. Lo sviluppo e la diffusione della trasformazione digitale proposta dall'Industria 4.0 agevola notevolmente il passaggio verso un tipo di economia circolare, poiché attraverso il tracciamento dei consumi delle risorse e dell'utilizzo dei prodotti, comporta importanti

aspetti innovativi nelle fasi di progettazione e produzione in termini di sostenibilità. Entrando nel dettaglio, solamente attraverso il digitale possono essere sviluppate tutte le attività dell'ecosistema circolare, poiché l'intero ciclo-vita di un prodotto sarà monitorato dall'Internet of Things (IoT), la quantità di merce prodotta raggiungerà l'efficienza in termini di sostenibilità grazie all'analisi di dati effettuata dai sistemi digitali, e grazie agli insights sulle abitudini di acquisto e utilizzo dei prodotti si riusciranno a prevedere le esigenze e i driver di acquisto dei consumatori, limitando al massimo gli sprechi e la produzione di lotti di prodotti più grandi del necessario.

La digitalizzazione, o trasformazione digitale, si rivela quindi un asset fondamentale per il passaggio verso un processo di economia circolare, tuttavia il suo impatto si denota maggiormente se si guarda all'intera filiera produttiva e non solo alla dimensione della singola impresa.

I vantaggi associati all'Economia circolare, e all'utilizzo di tecnologie avanzate, consistono tipicamente in sostenibilità economica, sociale e ambientale. A livello Europeo si stima che ci possano essere benefici per 1,8 mila miliardi di euro entro il 2030, parallelamente ad un incremento del PIL dell'11%.

L'utilizzo sempre più diffuso delle tecnologie guidate da Industria 4.0 e IoT, prevede di ottimizzare i processi e aumentarne l'efficienza, ma l'effetto più importante riguarda la riduzione dell'inquinamento e degli sprechi, confermando dunque l'impatto ecologico di questa nuova corrente di pensiero, verso un futuro più sostenibile.

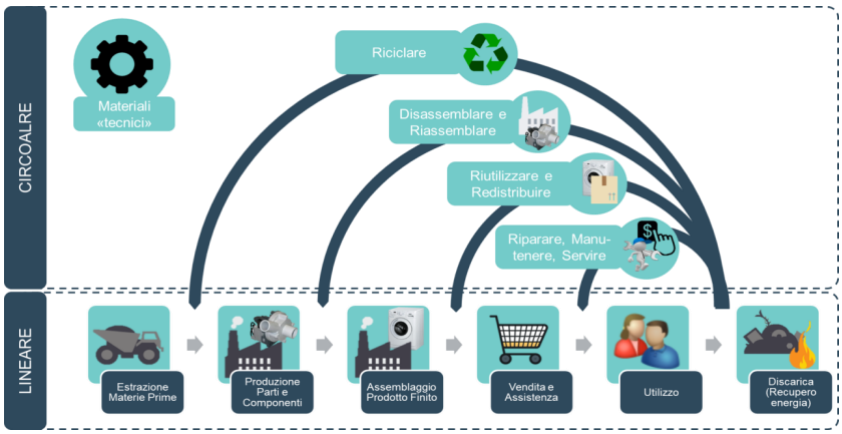


**Figura 16:** Il passaggio dalla Lean Production all'Economia Circolare.

# 3. La complementarità delle tecnologie di industria 4.0

Dopo aver approfondito nel dettaglio la definizione teorica di Industria 4.0, le sue dinamiche e le tecnologie caratterizzanti, occorre adesso fare un passo avanti verso il punto di vista tipico dell'impresa. Seppur vero che la quarta rivoluzione industriale sia caratterizzata principalmente dall'integrazione di oggetti fisici, lavoratori, macchine intelligenti, linee di produzione e processi, per le aziende non è sufficiente analizzare singolarmente tutte le azioni disponibili per completare la trasformazione digitale. È evidente che le aziende si trovino nella situazione di dover scegliere tra tutte le soluzioni proposte nei capitoli precedenti, un bundle sinergico e complementare di tecnologie che permettano di sfruttare il più possibile l'investimento, creando valore aggiunto per l'impresa.

Attualmente, la letteratura si è fermata ad esaminare principalmente l'impatto delle singole componenti di I4.0 sulle performance aziendali, trascurandone l'eventuale aspetto sinergico.

Questo rappresenta il punto di partenza della ricerca condotta nell'elaborato.

## 3.1 La ricerca

### 3.1.1 Team di ricerca

Il progetto di ricerca, descritto nei capitoli successivi, nasce dalla collaborazione di quattro giovani studiosi e ricercatori di Ingegneria Gestionale, provenienti da differenti atenei italiani:

- Daniele Battaglia - assegnista di ricerca del dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione al Politecnico di Torino;

- Francesco Galati - RST-B del Dipartimento di Ingegneria e Architettura all'Università di Parma;
- Margherita Molinaro - Assegnista di ricerca presso la Facoltà di Scienze e Tecnologie dell'Università di Bolzano;
- Elena Pessot - Assegnista di ricerca nell'Istituto delle Tecnologie Industriali Intelligenti e sistemi manifatturieri avanzati, istituito dal Consiglio nazionale della ricerca.

L'obiettivo primario è quello di dare, da un punto di vista teorico, un contributo alla letteratura presente sui temi di I4.0, con particolare riferimento alle complementarità e sinergie delle tecnologie. Da un punto di vista pratico invece, il risultato atteso consiste in un quadro di riferimento per i manager e per i policy-makers, utile per indirizzare gli investimenti sulle tecnologie emergenti secondo specifici obiettivi strategici e comprenderne gli impatti sulle performance e le condizioni necessarie per l'adozione.
La metodologia della ricerca viene approfondita nel Capitolo 3.1.4 dell'elaborato, in seguito ad un focus sul concetto di complementarità delle tecnologie.

### 3.1.2 Risultati attesi

I risultati attesi dalla ricerca sono riassumibili in 4 punti principali:

1) Identificare i meccanismi di complementarità tra le tecnologie I4.0, ricavati dalle testimonianze degli intervistati (esperti teorici, produttori di tecnologie, e aziende leader nell'innovazione);
2) Ricavare un framework che sia utile per guidare i manager e i policy-makers nell'indirizzare gli investimenti per l'innovazione;
3) Definire gli impatti, a livello di performance di impresa, dei diversi bundle di tecnologie opzionabili.

4) Individuare eventuali barriere, economiche e riguardanti la sostenibilità, ed evidenziare i potenziali impatti negativi.

### 3.1.3 La domanda di ricerca

Nel panorama industriale attuale le imprese, ancor di più in seguito alla crisi pandemica, non possono assolutamente essere esenti dalla trasformazione digitale, che comporta cambiamenti netti a livello di impresa ma che allo stesso tempo rappresenta un'importante opportunità di crescita. Come analizzato nei capitoli precedenti, in letteratura si trovano molte indagini riguardanti le caratteristiche fondamentali, i meccanismi di adozione e l'impatto sulle performance di un'impresa delle tecnologie I4.0 (come Internet of Things (IoT), Cyber-Phisical Systems (CPS), il tema dei Big Data e l'Additive Manufacturing).

Ciò che emerge è che sia riconosciuta l'esistenza di alcune tecnologie che operano come "fattori abilitanti" per delle altre (ad esempio, i Big Data giocano un ruolo fondamentale per il corretto funzionamento del CPS), ma si conosce poco sugli effetti derivanti dall'implementazione contemporanea di diverse tecnologie, in particolare a livello di performance di impresa. Basandosi su ciò che viene descritto in letteratura, sembra corretto pensare che più tecnologie vengano adottate dalle imprese, maggiori siano gli impatti sulle performance. Tuttavia, tipicamente i manager di un'azienda, soprattutto se si tratta di una PMI, risultano molto timorosi e poco predisposti nel fare investimenti rischiosi in tecnologie sconosciute. Per questo motivo è fondamentale riuscire a definire quali tecnologie di I4.0 siano complementari, ovvero quando l'implementazione contemporanea di due o più tecnologie porta ad effetti maggiori sulle performance aziendali rispetto all'adozione "stand-alone" di una tecnologia.

### 3.1.4 La metodologia di ricerca

Il progetto di ricerca, condotto dai quattro giovani ricercatori, utilizza le interviste rivolte ad esperti, ricercatori e aziende leader, come strumento principale dal quale identificare le eventuali complementarità e sinergie presenti tra le tecnologie di Industria 4.0.

In particolar modo, nel primo round di interviste, sono stati intervistati esperti e ricercatori, insieme ad esponenti appartenenti ad aziende leader nel settore dell'innovazione (ad esempio le aziende riconosciute come fari manifatturieri di Industria 4.0).

Concluso il primo round di interviste, è stata completata la trascrizione di ognuna di esse, e successivamente analizzata nel dettaglio. Da ciascuna trascrizione sono state poi costruite delle tabelle riassuntive riguardanti i temi principali trattati dagli intervistati, dalle quali è stato possibile il confronto e l'ottenimento di un framework finale. Quest'ultimo è servito per andare a raggruppare i punti di vista e le idee dei diversi ricercatori, e argomentare alcune considerazioni finali.

Le interviste condotte nella prima fase della ricerca sono state strutturate e secondo quattro argomenti principali da approfondire.

Dopo aver spiegato brevemente all'intervistato la natura dell'intervista e del progetto di ricerca, nella prima parte è stato approfondito il profilo personale dell'intervistato, con particolare attenzione all'organizzazione di provenienza, il ruolo e le principali mansioni, l'esperienza lavorativa in generale e successivamente l'esperienza lavorativa relativa ai temi di Industria 4.0.

La seconda parte dell'intervista è stata rivolta alla raccolta di informazioni sulle tecnologie I4.0, sugli ambiti di applicazione e sulle relative complementarità. In particolare, è stato chiesto agli intervistati quali siano le tecnologie complementari caratterizzanti il fenomeno di Industria 4.0 e quali i processi a livello di impresa su cui queste tecnologie abbiano un maggiore impatto attuale e quali potrebbero avere in

futuro. Per validare o contestare le risposte ottenute alle domande precedenti, sono stati successivamente richiesti degli esempi di esperienze personali, o progetti seguiti in prima persona, in cui tali combinazioni di energie abbiano portato a cambiamenti significativi nelle imprese, e il motivo per cui questo abbia funzionato, oppure esempi di situazioni in cui tali combinazioni non abbiano portato ai risultati attesi.

Nella terza sezione dell'intervista il focus è stato rivolto alle performance su cui, le combinazioni di tecnologie citate, abbiano avuto un maggiore impatto. Il punto di vista utilizzato riguarda i diversi ambiti di applicazione coinvolti all'interno della fabbrica e la possibile presenza di sinergie tra di essi, oppure la possibilità che contribuiscano singolarmente alle performance globali. Parlando di performance si fa riferimento a diverse aree di intervento: a livello operations, a livello economico-finanziario, il tema della sostenibilità ambientale e dell'impatto sociale, ed infine le conseguenze sul punto di vista decisionale-strategico.

La quarta e ultima sezione parte dell'intervista è stata rivolta a considerazioni aggiuntive riguardati i temi attuali più importanti secondo il parere degli intervistati, ed eventuali preziosi suggerimenti per la continuazione del progetto di ricerca.

## 3.2 Le interviste

Nel round di interviste iniziale, sono stati coinvolti principalmente alcuni ricercatori appartenenti al Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), altri esperti provenienti da alcuni Competence Center (CC) e Digital Innovation Hub (DIH). Di seguito, la lista delle interviste condotte, con particolare riferimento al ruolo e al background di competenza delle persone intervistate:

- Intervista 1: Ricercatore del CNR - Ingegnere informatico con specializzazione in sistemi di automazione e soluzioni di Robotica, a livello macchina/linea/sistema produttivo;
- Intervista 2: Ricercatore del CNR - Ingegnere gestionale con specializzazione in modellazione di sistemi di produzione, tramite utilizzo di tecnologie digitali;
- Intervista 3: Ricercatore del CNR - Informatico specializzato in digital factory/fabbrica virtuale, collegamento macchina con ambienti digitali e simulazione, principalmente sulla parte software. In passato occupato anche in robotica e stampa 3D (una volta chiamata rapid prototype);
- Intervista 4: CEO di un'azienda leader nel Machine Learning - Laurea in informatica - Inizialmente si occupa principalmente di analisi dei dati, sistemi di fabbrica/ufficio, tutto ciò che serve per far memorizzare i dati, analizzarli per poi trovare del valore dai dati stessi;
- Intervista 5: Digital Innovation Hub - Lean Experience Factory Manufacturing (LEF);
- Intervista 6: Direttrice esecutiva Competence Center Pisa - ARTES 4.0. Tipicamente l'ambito di riferimento è quello della robotica e dell'intelligenza artificiale;
- Intervista 7: Responsabile esecutiva del Competence Center START 4.0 - in particolare per supportare le imprese nel testare il proprio Digital Twin.

Nei seguenti sotto capitoli, saranno analizzate in sequenza le interviste, soffermandosi sugli argomenti principali e degni di nota trattati da ciascun intervistato.

### 3.2.1 Intervista 1

Il ciclo di interviste si apre con la testimonianza di un ricercatore appartenente al Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), che fin da subito ha posto la digitalizzazione del sistema produttivo al centro della discussione. Parlando di digitalizzazione del sistema produttivo si intende la realizzazione di un cyber-phisic system (CPS), ovvero il predecessore del Digital Twin, che permette di convogliare i dati orbitanti per gestire digitalmente la produzione.

I processi influenzati maggiormente sono tutti quelli che caratterizzano lo stabilimento produttivo, fino ad arrivare alla logistica in ingresso e in uscita. Uno dei problemi maggiormente diffusi riguarda la realizzazione del gemello digitale, in particolare la sua progettazione. Attualmente, il Digital Twin viene creato manualmente da un operatore esperto e questo comporta tempistiche rilevanti; il salto di qualità avverrà quando ogni singolo oggetto presente all'interno di un sistema di produzione, verrà consegnato direttamente dai fornitori con il proprio alter-ego digitale, semplificando notevolmente il collegamento all'intero simulatore.

Il principale impatto in termini di performance riguarda l'ottenimento della scalabilità e modularità dell'informazione: una volta realizzato un fedele gemello digitale, grazie a queste proprietà dell'informazione, potranno essere prese decisioni riguardanti la gestione dell'impianto di produzione, non più conservativa. Tuttavia, come condizione necessaria per realizzare questo meccanismo operativo, il sistema reale e quello virtuale devono dialogare in maniera bidirezionale.

Il concetto di dialogo bidirezionale tra uomo e macchina risulta importante anche nell'ambito della robotica. Infatti, parlando di robotica collaborativa e autonoma, la ricerca attuale è focalizzata sul passaggio da un protocollo *scan-based*, ovvero con

operazioni preimpostate e ripetitive, ad un protocollo *event-based*, ovvero sistemi asincroni che godono di intelligenza artificiale e capacità di adattamento alle differenti situazioni, dove il dialogo bidirezionale è fondamentale.

La prima intervista si conclude con due riflessioni riguardanti il panorama industriale italiano e il tema della sostenibilità.

Il panorama industriale italiano è caratterizzato prevalentemente da piccole-medie imprese, ma il problema maggiore riguarda la loro posizione rispetto al fenomeno di Industria 4.0, ancora lontana dalla realizzazione concreta delle tecnologie fino a qui considerate. Infatti, sarà opportuno verificare che siano soddisfatte le tematiche della terza rivoluzione industriale, cioè la diffusione dell'automazione e dei sistemi IT, prima di pensare alle tecnologie innovative della quarta.

La seconda riflessione riguarda il tema della sostenibilità: è un pensiero comune che la quest'ultima stia superando l'ondata di Industria 4.0, per il fatto che molte imprese lavorano per essere sostenibili grazie alle tecnologie I4.0 e ai suoi incentivi fiscali, e non pensano più alla sostenibilità come una delle conseguenze di queste tecnologie. Questo meccanismo può distorcere le imprese dalla corretta selezione dei bundle complementari di tecnologie, le quali saranno valutate principalmente per il loro impatto ambientale.

### 3.2.2 Intervista 2

Anche la seconda intervista considera la simulazione, ovvero il Digital Twin, come il punto di partenza delle tecnologie abilitanti di Industria 4.0, con particolare riferimento alla caratteristica di essere abilitante per l'implementazione di altre tecnologie: la realtà virtuale e aumentata, l'intelligenza artificiale, la robotica collaborativa e autonoma, e la sincronizzazione con altri sistemi reali. Riguardo ai processi produttivi maggiormente influenzati, viene confermata la difficoltà nella fase di progettazione del Digital Twin,

e successivamente si entra più nel dettaglio parlando di attività di gestione e controllo, che rappresenta il processo che ricava i maggiori benefici, e non si ferma solamente all'ambiente interno alla fabbrica, ma si espande fino alla completa integrazione con la filiera di produzione.

La complementarità delle tecnologie viene ottenuta esclusivamente dalla presenza del Digital Twin, funzionando da hub dove differenti tecnologie possono collaborare tra loro, come ad esempio la modellazione e la simulazione dei sistemi di produzione, oppure l'implementazione di tecnologie hardware come la robotica collaborativa.

I vantaggi ottenuti dallo sviluppo del gemello digitale di un sistema produttivo, in termini di performance a livello di impresa, sono molteplici. Oltre alle attività di progettazione già considerate nella prima intervista, la fase di installazione e rump-up dei macchinari e degli impianti viene velocizzata, poiché la realtà virtuale può fornire un ambiente sintetico dove cominciare a fare attività di simulazione e formazione del personale, permettendo un notevole risparmio di tempo e un conseguente risvolto positivo da un punto di vista economico. In quest'ultima fase, nasce il concetto di Virtual Commissioning, che consente la riduzione dei tempi necessari per portare un sistema di produzione al massimo potenziale. Le attività di gestione e controllo sono supportate dalla sincronizzazione del sistema reale con il modello digitale e dall'intelligenza artificiale, i quali permettono di fare simulazioni di eventi discreti e di prevenire e gestire eventuali picchi di domanda, guasti o fermi-macchina.

Analizzando alcune considerazioni finali dell'intervistato, viene rimarcata la predominanza di piccole-medie imprese nel panorama italiano e il loro ritardo nel completare la trasformazione digitale.

Parlando invece a livello di impresa, è sempre più sentito il forte rischio che le decisioni manageriali riguardanti l'adozione di differenti tecnologie, non vengano poi rispettate concretamente, da parte degli operatori presenti a bordo macchina. Questa è la diretta conseguenza della mancanza di formazione del personale, che necessita invece di

acquisire tutte le competenze necessarie per poter sfruttare pienamente le tecnologie sulle quali il top management ha deciso di investire.

### 3.2.3 Intervista 3

Nel terzo incontro, con l'ultima testimonianza di un ricercatore del Consiglio Nazionale delle Ricerche, parlando di tecnologie caratterizzanti Industria 4.0, sono stati approfonditi nuovamente il tema del Digital Twin, con il focus sull'integrazione orizzontale, e successivamente la robotica collaborativa e l'intelligenza artificiale. Come già approfondito dagli altri ricercatori, per costruire un gemello digitale è molto importante conoscere in ogni singolo dettaglio il proprio sistema produttivo, sia per la gestione interna che per il collegamento con la filiera di produzione; quindi, anche questo caso, il tema dell'informazione sarà centrale. Grazie alla condivisione dell'informazione, si può notare un notevole impatto a livello di Supply Chain. Ad esempio, principalmente nell'ambito automotive, grazie a numerose *scenario-analysis*, si può prevedere la carenza di materie prime e semilavorati o l'avvenire di insoliti eventi esterni, in modo da attivare in tempo reale la catena di fornitura ed evitare di fermare la produzione, garantendo una customer relationship solida. In questa ottica quindi, il Digital Twin, viene visto come sostegno per mitigare eventuali rischi esterni.

Parlando invece di Intelligenza Artificiale, occorre fare una distinzione tra il *Machine Learning* e il *Data Mining*: il primo, consiste nell'apprendimento automatico da parte della macchina, mentre il secondo utilizza algoritmi di programmazione e analisi matematiche-statistiche per trovare eventuali relazioni celate all'interno dei dati. Quest'ultimo viene spesso utilizzato dal machine learning, per ottimizzare il processo di apprendimento.

Tuttavia, l'ostacolo per l'intelligenza artificiale è rappresentato dalla grande mole di dati che vengono ricevuti dall'interno e dall'esterno, perciò emerge la necessità di sistemi in

grado di elaborarli più velocemente rispetto a quelli attuali. Il punto di svolta sarà rappresentato dai quantum computer, che basandosi sull'informatica e la comunicazione quantistica, consentiranno di ottenere un minor tempo di computazione e storage dei dati.

Rispetto alle interviste precedenti, in riferimento all'impatto sulle performance di impresa, è stata considerata la qualità del prodotto e del lavoro degli operatori. Conoscere a fondo il sistema produttivo porta ad un notevole miglioramento della qualità dei prodotti, sia in fase di produzione, che nella fase di assistenza post-vendita. È sempre più complicato competere sui prezzi con le aziende situate in paesi emergenti e con un costo della manodopera minore, ed è per questo motivo che la qualità dei prodotti ricopre un ruolo sempre più importante.

Inoltre, la corretta introduzione delle tecnologie I4.0, migliora la qualità del lavoro svolto dagli operatori. Questo miglioramento non va inteso solamente a livello fisico (esempio: robotica collaborativa), ma anche a livello cognitivo: l'intelligenza artificiale e la realtà virtuale/aumentata possono sopperire ad una serie di problemi legati alla cultura, all'invecchiamento e all'inesperienza dei lavoratori.

La terza intervista si è conclusa con un interessante considerazione sull'impatto ambientale del digitale. I grossi centri di calcolo che raccolgono, elaborano e immagazzinano dati, comportano dei consumi in termini di CO2 prossimi a quelli di una centrale a carbone, e questo succede per via della creazione dell'energia necessaria. In futuro, la spinta verso la trasformazione digitale delle imprese avrà un impatto ambientale notevole, ed è necessario a questo punto comprendere se sia possibile da controllare.

### 3.2.4 Intervista 4

Arrivando alla quarta intervista, si entra nel dettaglio della digitalizzazione del sistema di produzione, grazie al punto di vista di una azienda leader nel settore dell'intelligenza artificiale. Viene infatti rimarcato l'importanza dell'IoT, dei Big Data e degli Analytics, in qualità di tecnologie caratterizzanti l'evoluzione di Industria 4.0, dimostrando che i temi più rilevanti siano il dato e il machine learning.

Il machine learning, tra i molteplici vantaggi, permette di predire la qualità del prodotto finito basandosi sull'analisi statistica dei dati storici raccolti, cosa molto utile quando si tratta di prodotti che necessitano di test per la qualità di tipo distruttivo, evitando quindi maggiori sprechi e limitando i costi associati ad essi. Tuttavia, la criticità consiste nel saper gestire e analizzare miliardi di dati e nella necessità di compiere continuamente aggiornamenti dei macchinari. La conseguenza diretta della complementarità di queste tecnologie, si traduce in un notevole impatto a livello economico-finanziario, ancora però difficile da quantificare.

La testimonianza di un imprenditore, attivo nel settore dell'intelligenza artificiale a servizio delle imprese, ha dato origine a due nuove riflessioni: la prima riguardante gli incentivi e politica fiscale, e la seconda riguardante le competenze interne delle imprese. Seppur vero che i motivi principali dell'adozione di tecnologie I4.0, da parte delle aziende, siano legati alla ricerca di migliorare la qualità dei prodotti minimizzando i tempi e i costi, ciò che ha veramente spinto le imprese appartenenti al panorama industriale italiano, ad investire in nuove tecnologie, è la parte fiscale. Senza i piani di investimento presentati dal Ministero dello Sviluppo Economico, approfonditi nel Capitolo 1.3.2, prima con l'iper-ammortamento e dopo con il credito d'imposta, sarebbe ancora lontana l'idea della trasformazione digitale. A quest'ultimo aspetto si collega la seconda riflessione. Ciò che manca nella maggior parte delle piccole-medie imprese italiane è infatti la capacità di cogliere le opportunità concesse dalle tecnologie I4.0 e di

sfruttarle successivamente in base a ciò che realmente serve. Perché questo accada, servono risorse interne dotate di forti competenze innovative e tecnologiche (e.g. Digital Manager).

### 3.2.5 Intervista 5

Dopo aver analizzato il punto di vista di un imprenditore attivo nel panorama industriale italiano, si ritorna all'ambito della ricerca e dell'innovazione, intervistando un componente del Digital Innovation Hub LEF (Lean Experience Factory). Tra le tecnologie caratterizzanti Industria 4.0, oltre a quelle già considerate nelle interviste precedenti e al tema del dato, è stata approfondita la cyber-security, vista come una misura necessaria per tutelare le imprese nella digitalizzazione dei sistemi di produzione. Tuttavia, prima di parlare di sistemi interamente digitalizzati, secondo l'intervistato, è necessario consolidare la "Lean production", e successivamente si può completare la trasformazione digitale. Una volta conclusa la digitalizzazione, oltre ad un impatto su tempo-costo-qualità di produzione, aumenta la possibilità di diversificare i propri modelli di business e i prodotti dalla concorrenza, generando un vantaggio competitivo.

Sul tema della digitalizzazione, è emersa la seguente interessante considerazione. Il sistema digitalizzato, se strutturato correttamente, svolge la funzione di amplificatore: questa caratteristica fa si che se dentro l'azienda si lavora in modo efficiente, allora questa efficienza verrà amplificata verso l'esterno. Al contrario, se all'interno domina l'instabilità, sarà proiettata verso l'esterno, causando problemi sull'intera filiera produttiva.

### 3.2.6 Intervista 6

Con la sesta intervista cambia l'ambiente di ricerca avvicinandosi ad uno dei Competence Center italiani, grazie alla testimonianza della Direttrice esecutiva di ARTES 4.0 (Advanced Robotics and enabling digital TEchnologies & Systems 4.0), specializzato nel tema della robotica.

Infatti, parlando di tecnologie caratterizzanti I4.0, è stato possibile approfondire il tema dell'intelligenza artificiale, vista come il punto di arrivo della complementarità tra l'IoT/Cloud/CyberSecurity, e il tema della robotica avanzata.

Le tecnologie citate, come anticipato nelle precedenti interviste, vanno ad influenzare tutti i processi aziendali, nessuno escluso, tuttavia attualmente è ancora troppo presto per riuscire a quantificare il loro impatto economico e in termini di performance di impresa.

Parlando di processi aziendali, è opportuno sottolineare come anche il settore delle risorse umane possa ricavare grandi benefici: negli ultimi tempi, infatti, sono molte le possibili applicazioni di intelligenza artificiale a favore delle risorse umane, le quali però richiedono sempre di più il "change management" per via delle inerzie cognitive riscontrate dal personale adulto coinvolto nella gestione di esse.

L'intervista in analisi ha dato l'opportunità di considerare le tecnologie I4.0 secondo un nuovo punto di vista: il Digital Twin e l'integrazione verticale/orizzontale vanno viste come il punto di arrivo della trasformazione digitale; è quindi indispensabile che le tecnologie fondanti (connettività e integrazione dei dati) siano ben consolidate all'interno del sistema produttivo.

Per quanto riguarda la robotica avanzata, autonoma o collaborativa, può essere considerata sia come una tecnologia integrata, ad esempio all'interno di una linea di produzione, sia come una tecnologia "stand-alone". Nell'ultimo caso, in particolare, i contesti applicativi sono sempre più diffusi e portano numerosi vantaggi per la qualità

del lavoro per gli operatori. Alcuni esempi di robotica applicata: robot dotati di intelligenza integrata a scopo didattico (es: linea e.DO - Comau); robotica utilizzata per l'accoglienza o l'assistenza di grandi uffici (es: Robot Pepper - Aldebaran Robotics), robot utilizzati per sostituire gli operatori all'interno della fabbrica in condizioni di lavoro complicate (ad esempio per l'elevata temperatura), robot utilizzati per l'ispezione di spazi molto stretti e difficili da raggiungere (es: "robot-serpente e mano robotica"), esoscheletri in grado di potenziare le capacità fisiche dell'utilizzatore costituendo una sorta di "muscolatura artificiale", ed infine i robot per l'ispezione e le operazioni subacquee.

Inoltre, la ricerca attuale è focalizzata sullo sviluppo dell'aspetto empatico e sull'apprendimento autonomo dei robot, come ad esempio il robot ICub, "robot bambino" in grado di apprendere facendo differenti cose, proprio come i bambini.

La penultima intervista è terminata con alcune interessanti considerazioni finali:

- Capita spesso di trovare dei progetti riguardanti l'adozione tecnologica e la trasformazione digitale, che non vanno a buon fine. Questo accade tipicamente per il fatto che vengono commessi errori di stima iniziale rispetto ai tempi effettivamente necessari per l'implementazione. Dunque, l'aspettativa deve essere chiara fin dall'inizio, per evitare poi un effetto di delusione dovuto alla necessità di tempi lunghi per l'implementazione. Al contrario, se il progetto viene gestito con lucidità e pazienza, i tempi lunghi possono rivelarsi preziosi, poiché consentono ai lavoratori interessati di integrarsi completamente con le nuove tecnologie.
- In seguito, è stato ripreso il concetto riguardante la "*molla economica*", analizzato nella quarta intervista. Il contributo dell'intervista ha evidenziato il fatto che le aziende tendono ad investire in tecnologie I4.0 spinti dalla presenza degli incentivi fiscali, e non per la vera esigenza della trasformazione digitale.
- Infine, collegandosi al discorso degli incentivi fiscali, è emerso come spesso vengano fraintesi con gli incentivi per l'innovazione. Negli ultimi anni, queste due

realtà vengono considerate come una cosa sola, il che nuoce alla reputazione dello stato italiano, che è sempre stato considerato un paese capace di produrre ed esportare innovazione. “siamo diventati più utilizzatori di tecnologie e meno inventori”.

### 3.2.7 Intervista 7

Con l’intervista alla direttrice esecutiva di START 4.0, uno degli otto Competence Center di italiani, che supporta le imprese per testare i prototipi di Digital Twin, si chiude il ciclo di interviste della ricerca. I progetti seguiti da START 4.0, parlando di tecnologie caratterizzanti I4.0, riguardano tipicamente la costruzione e l’utilizzo del gemello digitale e l’applicazione dell’intelligenza artificiale, e di conseguenza il tema della cyber-security.

Il progetto DIGITbrain, proveniente dal programma Horizon e seguito da START 4.0, ha come obiettivo quello di sviluppare un cervello digitale, visto come evoluzione del gemello digitale, in grado di adattarsi in base al contesto di applicazione. Sarà dunque uno strumento OpenSource messo a disposizione delle piccole-medie imprese manifatturiere europee, per consentire l’accesso a sistemi di produzione digitali avanzati, utili per raccogliere e scambiarsi dati in massima sicurezza e velocità, e per acquisire e valutare i dati del ciclo vita di un prodotto. Questo progetto rappresenta un punto di svolta poiché consentirebbe alle imprese di godere dei benefici di un gemello digitale, senza dover investire tutte le proprie risorse nel tentativo di costruirne uno proprio.

Attualmente, START 4.0 ha cominciato a seguire altri due progetti, il primo riguardante la quantum communication, e il secondo sullo sviluppo e la diffusione del 5G: la prima, nasce dall’esigenza di elaborare le comunicazioni tra le diverse tecnologie, garantendo allo stesso tempo una sicurezza superiore a quella presente nella cyber-security attuale;

mentre il 5G è una tecnologia che serve per migliorare la comunicazione in tempo reale e la raccolta dati di un sistema sensorizzato (es: progetto sviluppato con Vodafone per le applicazioni di controllo del traffico in tempo reale).

Successivamente, come nelle altre interviste, il tema del discorso è stato indirizzato verso le performance di impresa che subiscono un maggiore impatto dall'implementazione di determinate tecnologie, dando luogo ad un interessante considerazione. Secondo il parere dell'intervistato, portavoce del Competence Center START 4.0, la valutazione dell'impatto sulle performance dipende dalla dimensione dell'azienda considerata, a seconda della quale i target di riferimento sono differenti, e di conseguenza anche i benefici ottenuti. Nelle imprese piccole, anche la semplice attività di orientamento e formazione verso le tecnologie, ha un beneficio straordinario, specialmente nelle imprese che non dispongono di competenze tecnologiche sufficienti. Dopodiché ci sono le imprese che vantano un ottimo know-how nell'utilizzo delle tecnologie, generalmente piccole-medie imprese inserite in filiere collegate a grandi player dell'industria di riferimento. I benefici principali vengono ottenuti dall'integrazione delle tecnologie e dalla collaborazione con la Supply-Chain a valle o a monte. In questa circostanza, questa categoria di imprese ricade spesso nell'errore di riuscire nell'integrazione verticale delle loro tecnologie, senza riuscire però a comprendere come integrarsi orizzontalmente. Nelle aziende considerate come i "grandi player" della filiera, i principali impatti si notano a livello di filiera, poiché a livello di fabbrica sono già molto avanzati dal punto di vista tecnologico ed è difficile ottenere di più.

Infine, dopo aver ribadito la necessità di disporre di persone competenti e preparate all'utilizzo e alla gestione delle tecnologie I4.0, senza aspettarsi di investire in tecnologie definite "chiavi in mano", l'intervista termina con un cenno all'aspetto energetico della trasformazione digitale delle imprese.

La trasformazione digitali, infatti, deve tenere interamente in considerazione gli aspetti energetici collegati all'adozione di tecnologie I4.0. Generalmente si pensa all'adozione delle tecnologie I4.0 per migliorare l'efficienza dei processi, in termini di tempi-costi-qualità. È bene ricordare che oltre a questo contributo, è presente un miglioramento anche a livello di consumi di energia, difficile da quantificare sulla singola impresa, ma di grande rilievo considerando l'intera filiera di produzione.

## 3.3 Analisi dei Risultati

Giunti a questo punto dell'elaborato, dopo aver analizzato singolarmente le interviste condotte per la ricerca, è opportuno riassumere quanto è emerso. Nei capitoli seguenti saranno considerate le tematiche più rilevanti trattate durante le interviste, riunendo i contributi di ciascun intervistato in un'unica risposta a ciascun quesito. Le analisi dei risultati giungeranno al termine con un framework finale, che potrà servire da linea guida per i manager delle aziende e i policy-makers durante la scelta degli investimenti tecnologici da effettuare.

### 3.3.1 Le tecnologie più rilevanti per le imprese

Come anticipato nel capitolo 3.1.4, riguardante la metodologia di ricerca utilizzata, in seguito ad una parte introduttiva riguardante la provenienza e il settore di competenza dell'intervistato, il primo argomento affrontato durante l'intervista riguarda le tecnologie di Industria 4.0 maggiormente diffuse nelle aziende del panorama industriale italiano, sulle quali c'è attualmente un maggiore interesse.

Partendo dal presupposto che la maggior parte delle tecnologie citate dagli intervistati siano già state affrontate nei capitoli riguardanti la revisione della letteratura presente, le tecnologie che risultano ad oggi maggiormente diffuse durante il percorso di trasformazione digitale delle imprese, secondo le testimonianze raccolte, sono dunque:

- IoT;
- Big Data & Data analytics;
- Cloud;
- Digital Twin / simulazione;
- Robotica avanzata (collaborativa e autonoma);

- Intelligenza artificiale e Machine Learning;
- Realtà aumentata e virtuale;
- Cyber-security.

### 3.3.2 L'impatto sui processi e sulle performance di impresa

Dopo aver elencato le tecnologie analizzate nel corso delle interviste, è opportuno soffermarsi ad approfondire il secondo argomento principale: l'analisi dell'impatto delle tecnologie sui processi e sulle performance delle imprese.

Fin da subito, quello che emerge è che tutti i processi aziendali siano condizionati positivamente dall'introduzione delle tecnologie di Industria 4.0, tuttavia la condizione necessaria perché questo avvenga è la totale conoscenza del sistema stesso e dei suoi processi di produzione.

I primi impatti positivi si possono rilevare nelle fasi di *progettazione* e *design*, del processo produttivo e del prodotto finale. Infatti, grazie all'implementazione del Digital Twin, la progettazione risulta decisamente più rapida e più efficiente, poiché vede una notevole riduzione di errori di progettazione grazie alla possibilità di effettuare le simulazioni sul modello digitale. Inoltre, sempre parlando di fasi preliminari alla produzione, anche la fase di *deployment* e di *rump-up* dei macchinari risulta più efficiente in termini di tempistiche necessarie e dei relativi costi sostenuti.

In secondo luogo, un notevole impatto positivo può essere rilevato nelle fasi di *gestione e controllo della produzione*. Le tempistiche necessarie per la produzione vengono ridotte notevolmente, garantendo una capacità produttiva dei sistemi superiore e accelerando sensibilmente il raggiungimento dello scale-up, ovvero delle economie di scala. Infine, la *qualità del prodotto finale* risulta essere maggiore grazie ai sistemi di simulazione e all'applicazione della robotica avanzata all'interno delle linee di produzione; quest'ultima, infatti, garantisce una maggiore precisione nelle lavorazioni.

Grazie allo sviluppo dell'intelligenza artificiale e del machine learning, talvolta supportate da dispositivi con realtà aumentata o virtuale, le *attività di manutenzione* risultano essere più rapide, e di conseguenza meno dannose per via del necessario tempo di sospensione della produzione.

L'introduzione dell'intelligenza artificiale e del machine learning, ovvero della capacità dei macchinari di prendere delle decisioni in tempo reale basandosi su dati storici raccolti, ha portato al concetto di *manutenzione predittiva*, utile per prevenire i guasti dei macchinari e gli sprechi dei prodotti in fase di lavorazione. Quest'ultimo aspetto, infatti, diventa centrale quando si tratta di sistemi di produzione di oggetti che necessitano di prove distruttive per la *qualità*: grazie alle analisi predittive, le eventuali difettosità dei prodotti sono prevedibili nelle fasi iniziali di produzione, riducendo così gli sprechi e i costi annessi.

Oltre alla progettazione e alla gestione dei sistemi di produzione, anche la *gestione delle risorse umane* viene efficientizzata. Ma perché ciò avvenga è necessario aumentare i corsi di formazione e training del personale svolti in azienda, in modo tale da realizzare il cosiddetto "change-management" verso un team di risorse specializzate nel loro campo di azione ed in grado di operare all'interno di un'azienda interamente digitalizzata. La realizzazione dei *corsi di formazione*, inoltre, è favorita dall'ausilio della realtà aumentata e della realtà virtuale, le quali sono in grado di simulare attraverso dei tools digitali, tutte le operazioni che l'operatore dovrà essere in grado di effettuare.

Per concludere l'argomento relativo alle risorse umane, si può notare un grande miglioramento nella *salute degli operatori*, sia da un punto di vista fisico (grazie alla robotica collaborativa e autonoma) che da un punto di vista cognitivo (per via dell'intelligenza artificiale e della realtà aumentata).

Una volta raggiunta la completa digitalizzazione del sistema produttivo e la piena comprensione del suo funzionamento, attraverso il fedele gemello digitale creato, si possono sfruttare le informazioni raccolte per la *gestione dell'ambiente esterno*, ovvero

a livello di supply chain. Grazie alla possibilità di effettuare in anticipo delle simulazioni di tipo "what-if" attraverso il Digital Twin, si è in grado di prevedere la necessità delle componenti in ingresso, e di conseguenza attivare la supply chain per garantire l'arrivo delle materie prime e dei semilavorati nel momento in cui servono per la produzione. Questo aspetto si traduce nella garanzia di limitare al massimo le interruzioni della produzione. Inoltre, grazie al migliore controllo della catena di fornitura, anche i costi di magazzino vengono ridotti sensibilmente.

Parallelamente alla gestione della supply chain, continuando a parlare di ambiente esterno al sistema produzione, grazie al Digital Twin si può riscontrare un miglioramento nella *customer relationship*, in quanto l'avvento di eventuali rischi può essere mitigato grazie alla simulazione e la previsione di eventi critici. Questo aspetto permette di rispettare le scadenze programmate verso i clienti finali, con una conseguente riduzione delle eventuali penali contrattuali.

La relazione con il cliente finale non è migliorata solamente dall'utilizzo di sistemi di simulazione della produzione, ma anche dalla sensoristica (IoT) installata direttamente sul prodotto finito, la quale garantisce: la raccolta di dati relativi alle abitudini di utilizzo dei clienti, utili per il miglioramento del prodotto e per eventuali analisi di mercato, ed infine i dati utili per il monitoraggio e la manutenzione, ove necessaria.

Come anticipato nei paragrafi precedenti, questi vantaggi ottenuti attraverso la corretta trasformazione digitale delle imprese, si concretizzano infine in un impatto finanziario positivo, che riguarda sia i costi legati alla produzione e sia i costi di amministrazione e di gestione di un'impresa.

### 3.3.3 Le Complementarità tecnologiche

Nei seguenti paragrafi, saranno analizzate le complementarità delle tecnologie caratterizzanti il processo di trasformazione digitale delle imprese. Si cercherà di stabilire quando l'implementazione contemporanea di due o più tecnologie porta ad effetti maggiori sulle performance aziendali rispetto all'adozione "stand-alone" di una tecnologia. Per fare ciò, si parte dalle complementarità delle tecnologie di primo livello, per poi considerare le eventuali sinergie presenti tra le tecnologie più complesse, ovvero le complementarità di secondo livello.

La prima grande complementarità essenziale tra le tecnologie proposte da Industria 4.0, è caratterizzata dalla simultanea implementazione di alcune tecnologie di base, ovvero IoT, Big Data e Cloud. Queste tre tecnologie, infatti, sono fondamentali per la costruzione del Digital Twin e dei processi di simulazione. Quest'ultimo, secondo le testimonianze degli intervistati, rappresenta l'innovazione tecnologica più promettente e con maggiori risvolti positivi per le imprese. Successivamente, sul gemello digitale, si innestano poi una serie di tecnologie più "stand-alone", come l'additive manufacturing, la realtà virtuale, la realtà aumentata, la robotica collaborativa e autonoma

La seconda complementarità da analizzare riguarda l'utilizzo dell'intelligenza artificiale. Infatti, per raggiungere una gestione ottimale dell'intelligenza artificiale, sarà necessario combinare l'IoT con il Cloud, e proteggere le informazioni memorizzate con un'ottima cyber-security; senza la combinazione complementare di queste tre tecnologie, qualsiasi macchinario, o device, che utilizza l'intelligenza artificiale, non sarebbe sfruttato al massimo.

Successivamente alla corretta installazione delle tecnologie di base sopracitate, si potrà sfruttare la sinergia presente tra il Digital Twin e l'intelligenza artificiale. Infatti, grazie al gemello digitale si potrà simulare il comportamento del sistema di produzione sotto determinate condizioni, ma con il contributo dell'intelligenza artificiale si possono

effettuare delle simulazioni predittive basandosi sui dati storici. Grazie a questo meccanismo, il sistema digitalizzato sarà in grado di effettuare eventuali azioni correttive in tempo reale, prevenendo qualsiasi tipo di problematica che possa rallentare o fermare il sistema stesso.

Una volta ottenuta nell'azienda la completa digitalizzazione e integrazione interna, c'è la possibilità di sfruttare la sensoristica installata con la relativa raccolta di dati storici, i sistemi di simulazione e le previsioni "intelligenti", per realizzare una efficiente integrazione con l'ambiente esterno, ovvero a livello di Supply Chain. Grazie a questa complementarità si riuscirà a ridurre notevolmente le inefficienze interne, a migliorare il rapporto con gli attori presente a monte e a valle della filiera produttiva, e a ottimizzare i flussi di lavoro.

Seppur vero che le complementarità appena analizzate siano eccellenti in termini di impatto sulle performance di un'impresa, devono essere considerate come il punto di arrivo della trasformazione digitale. Solo una volta raggiunta la completa padronanza e abilità sulle tecnologie definite "fondanti", si potrà giovare dei benefici derivanti dalla simulazione e integrazione dei sistemi di produzione.

Per concludere l'analisi delle complementarità più rilevanti delle tecnologie di Industria 4.0, è doveroso fare alcune considerazioni riguardanti le opportunità future delle imprese.

Attualmente, soprattutto i Digital Innovation Hub, finanziati dai fondi provenienti dai programmi nazionali ed europei, collaborano in progetti dedicati allo sviluppo e alla realizzazione della Quantum communication e del 5G.

L'informatica quantistica, infatti, garantisce una sicurezza maggiore per le comunicazioni digitali interne alle imprese. Mentre il 5G è fondamentale per quanto riguarda la trasmissione dei dati in tempo reale, necessaria per il corretto funzionamento dei modelli di simulazione e dell'intelligenza artificiale.

Queste ultime due tecnologie, unite allo sviluppo del Digital Twin e dell'Intelligenza artificiale, serviranno per creare un bundle di tecnologie ancora più sinergico e con risultati superiori rispetto a quelli attuali.

## 3.4 Il risultato della ricerca

Come premesso nell'introduzione della domanda di ricerca, a seguito dell'analisi di ciascuna intervista e della definizione delle complementarità tecnologiche più promettenti per la trasformazione digitale delle imprese, è opportuno riassumere tutto in un framework finale, riportato in Figura 17. Tale risultato segue la struttura delle macroaree trattate durante le interviste, ovvero: tecnologie I4.0 più rilevanti, le complementarità presenti tra le stesse, e il loro impatto sui processi e sulle performance aziendali.

I risultati ottenuti dalla ricerca mirano a dare un contributo teorico alla letteratura presente sul Paradigma I4.0, e un contributo pratico in qualità di quadro di riferimento per le aziende e per i policy-makers. Queste linee guida, infatti, saranno utili per le aziende per indirizzare gli investimenti secondo specifici obiettivi strategici e per comprendere gli impatti sulle performance e le condizioni contestuali necessarie per l'adozione.

| TECNOLOGIE DI I4.0 | COMPLEMENTARITÀ di PRIMO LIVELLO | COMPLEMENTARITÀ di SECONDO LIVELLO | IMPATTO SU PROCESSI E PERFORMANCE AZIENDALI |
|---|---|---|---|
| • **IoT;**<br>• **Big Data & Data analytics;**<br>• **Cloud;**<br>• **Digital Twin / simulazione;**<br>• **Robotica avanzata (collaborativa e autonoma);**<br>• **Intelligenza artificiale e Machine Learning;**<br>• **Realtà aumentata e virtuale;**<br>• **Cyber-security.** | • **IoT**<br>• **Big Data**<br>• **Cloud**<br><br>• **IoT**<br>• **Cloud**<br>• **Cyber-security** | **Digital Twin**<br>+<br>**Intelligenza artificiale**<br>+<br>**Integrazione Verticale/Orizzontale** | • Progettazione e Design<br>• Deployment e Rump-up dei macchinari<br>• Gestione e controllo della produzione<br>• Qualità del prodotto<br>• Gestione delle risorse umane<br>• Impatto finanziario<br><br>• Manutenzione ordinaria<br>• Manutenzione predittiva<br>• Gestione e controllo della produzione<br>• Rapporto con i fornitori e con i clienti<br><br>• Gestione della Supply-Chain<br>• Customer relationship<br>• Rapporto con i fornitori e con i clienti<br>• Impatto finanziario |

**Figura 17:** Framework finale della Ricerca

# Conclusioni

L'elaborato presentato ha delineato quali siano le principali tecnologie che un'azienda debba tenere in considerazione durante il processo di trasformazione digitale. Questo percorso però, risulta essere complicato in quanto non è sufficiente una semplice adozione delle tecnologie abilitanti per realizzare una fabbrica digitale ed interconnessa. Per ottenere i risultati desiderati, è necessaria una completa comprensione e conoscenza del proprio sistema produttivo, ed è importante disporre delle risorse e competenze interne in grado di sfruttare al meglio le opportunità di investimento che si presentano con la diffusione delle tecnologie di Industria 4.0.

Considerando il panorama industriale italiano, i 2/3 delle aziende sono piccole-medie imprese (PMI), e la maggior parte di esse è ancora lontana dall'utilizzo di alcune tecnologie di base. Perciò prima di affrontare investimenti in bundle sinergici di tecnologie avanzate, proposte da Industria 4.0, occorre consolidare e fare pratica con le tecnologie appartenenti alla terza rivoluzione industriale, cioè la diffusione dell'automazione e dei sistemi IT. Una volta raggiunta questa situazione, si potranno prendere in considerazione le tecnologie più complesse di Industria 4.0.

Basandosi sulla letteratura e sulle interviste condotte durante la ricerca, emerge che i risultati più importanti si ottengano grazie all'adozione del gemello digitale (Digital Twin) e dell'Intelligenza Artificiale. Queste due tecnologie inoltre, se adottate simultaneamente, dimostrano un aspetto sinergico e un maggiore impatto sulle performance aziendali rispetto all'adozione delle singole. Inoltre, è emersa una seconda complementarità degna di nota, che riguarda l'integrazione verticale, e orizzontale, di un'impresa. Infatti, una volta consolidata la trasformazione digitale, attraverso l'utilizzo del Digital Twin e di Intelligenza Artificiale, sarà possibile realizzare la completa integrazione con l'intera Supply Chain in cui si opera.

Non meno importanti sono alcune tecnologie che possono essere denominate "*stand-alone technologies*", anch'esse con rilevanti impatti sui processi e sulle performance di impresa. Le principali sono *l'additive manufacturing*, che supporta la progettazione e la produzione; la *realtà virtuale* e *aumentata*, le quali trovano un ruolo importante nella manutenzione e nella salute dei lavoratori; la *robotica collaborativa* e la *robotica autonoma*, che permettono di ridurre il tempo ciclo delle lavorazioni e di migliorarne la precisione, fornendo un KPI chiaro e misurabile.

Al giorno d'oggi, i principali progetti riguardanti la ricerca e l'innovazione tecnologica, sono focalizzati sull'informatica quantistica e sul 5G. Questo perché consentiranno di migliorare ancor di più la velocità di trasmissione in tempo reale dei dati e delle informazioni, fondamentali per la piena ottimizzazione delle tecnologie di Industria 4.0.

Grazie alle testimonianze raccolte nelle interviste, si può notare come le complementarità tecnologiche investigate all'interno del progetto di ricerca, unite all'adozione delle cosiddette tecnologie stand-alone, portino a dei notevoli risultati positivi in termini di performance finanziarie, seppur di difficile enumerazione.

Un altro aspetto da tenere in considerazione riguarda la rivoluzione del ruolo dei lavoratori all'interno di un'impresa che si trova all'interno del processo di trasformazione digitale. La maggior parte dei lavoratori considera questo processo come un elemento che stimola la disoccupazione, a causa del sempre più diffuso impiego dei robot autonomi e di applicazioni di intelligenza artificiale che sono in grado di prendere decisioni autonome. Tuttavia, le tecnologie di Industria 4.0 riescono a migliorare la salute dei lavoratori e a creare nuovi posti di lavoro, permettono alle aziende di realizzare prodotti e servizi di qualità superiore, e consentono la realizzazione di nuovi servizi integrati con i prodotti e con l'obiettivo di migliorare il valore offerto al cliente.

Le istituzioni assumono in tutto ciò un ruolo determinante, poiché il loro compito è quello di tutelare la posizione dei lavoratori e allo stesso tempo di supportare e

incentivare le imprese a percorrere la strada della digitalizzazione mediante una serie di riforme appositamente strutturate.

La pandemia da Covid-19, oltre ad aver portato con sé conseguenze negative, ha fatto sì che vari paesi iniziassero ad avvicinarsi al mondo della digitalizzazione, la quale ha dato un supporto fondamentale per affrontare il periodo di crisi. Infatti, è inevitabile pensare che il digitale faccia parte della vita dell'uomo e che si affermerà sempre di più in futuro.

Per concludere, il progetto di ricerca descritto nell'elaborato di tesi ha dato l'ennesima dimostrazione, a supporto della letteratura, riguardo al fatto che qualsiasi azienda, che voglia essere competitiva sul mercato, non possa rimanere esente dal percorso di trasformazione digitale, e che non possa evitare investimenti specifici che portino ad una completa digitalizzazione dei processi interni, fondamentali per un'ottimale integrazione con la filiera produttiva in cui operano.

# Bibliografia

Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019).
*"Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies".*
International Journal of Production Economics, 210, 15-26;

Armando Calabrese, Nathan Levialdi Ghiron & Luigi Tiburzi (2020):
*'Evolutions' and 'revolutions' in manufacturers' implementation of industry 4.0: a literature review, a multiple case study, and a conceptual framework, Production Planning & Control,*
DOI: 10.1080/09537287.2020.1719715;

Yuanbin Wang, Yuan Lin, Ray Y. Zhong & Xun Xu (2018):
*"IoT-enabled cloud- based additive manufacturing platform to support rapid product development"*
International Journal of Production Research, DOI: 10.1080/00207543.2018.1516905;

Giovanna Culot, Guido Nassimbeni, Guido Orzes, Marco Sartor
*"Behind the definition of Industry 4.0: Analysis and open questions";*

Lucas Santos Dalenogare, Guilherme Brittes Benitez, Néstor Fabián Ayala, Alejandro Germán Frank,
*"The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance";*

BCG The Boston consulting group
Michael Rüßmann, Markus Lorenz, Philipp Gerbert, Manuel Waldner, Jan Justus, Pascal Engel, and Michael Harnisch
*"Industry 4.0: The future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries";*

Erik Hofmann, Marco Rüsch
*"Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics";*

Tortorella, G. L., & Fettermann, D. (2018).
*"Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies."*
International Journal of Production Research, 56(8), 2975-2987.

# Sitografia

https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/Piano_Industria_40.pdf;

https://www.industria40.it;

https://consulenzaerisorse.it/guida-industria-4-0/;

https://www.innovationpost.it/2021/06/16/horizon-europe-147-miliardi-in-due-anni-per-la-trasformazione-digitale-e-verde-dellunione/;

https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/sites/default/files/H2020_IT_KI0213413ITN.pdf;

https://learn.wu.ac.at/dotlrn/clubs/forschungsprojekte/xowiki/en/horizon2020;

https://www.fimap.srl/horizon-europe-programma-ue-2021-2027-finanziamenti-innovazione-ricerca/.

https://www.agendadigitale.eu/industry-4-0/piano-transizione-4-0-il-nuovo-credito-di-imposta-tutte-le-aliquote-e-i-beni-compensabili/;

https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/Slide_PianoNazioneTransizione40-19-11-20.pdf;

https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/covid-19-an-inflection-point-for-industry-40;

https://www.industry4business.it/industria-4-0/la-pandemia-da-covid-19-segna-un-punto-di-flessione-per-lindustria-4-0/;

https://www.pnud.camcom.it/digitalizzazione-strumenti-e-servizi-informatici/punto-impresa-digitale-pid/tecnologie-abilitanti;

https://www.mecalux.it/blog/tecnologie-abilitanti;

https://blog.osservatori.net;

https://www.ip4fvg.it/nodi/advanced-manufacturing-solutions/;

https://www.ewellix.com/en/industries/factory-automation/additive-manufacturing;

https://silverwingsxr.com/blog/2021/03/02/augmented-reality/;

https://www.ptc.com/it/industry-insights/digital-twin;

https://www.necte.it/integrazione-verticale-e-orizzontale-nellindustria-4-0/;

https://www.innovationpost.it/2021/05/29/la-salute-e-sicurezza-sul-lavoro-al-tempo-dellindustria-4-0/;

https://www.entersoftware.it/industria-4-0-cose-esempi-opportunita-litalia/;

https://www.circularmobility.it/blog/dettaglio/economia-circolare-e-industria-40-verso-la-sostenibilita-ambientale;

https://www.industry4business.it/esperti-e-analisti/creare-valore-con-leconomia-circolare-opportunita-di-business-e-spinte-verso-la-sostenibilita/;

https://www.eage.it/machine-learning/la-differenza-tra-data-mining-e-machine-learning;

https://it.wikipedia.org/wiki/Computer_quantistico;

https://www.start4-0.it/progetto-digitbrain/;

http://preparatialfuturo.confindustria.it/digital-innovation-hub/cosa-sono/;

https://www.mise.gov.it/index.php/it/incentivi/impresa/centri-di-competenza.