



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale

**INNOVAZIONE DEI PROCESSI PRODUTTIVI; INDAGINE  
SULLE MODALITÀ DI ADOZIONE DELLA LEAN 5.0 IN  
AZIENDA.**

**PRODUCTION PROCESS INNOVATION: AN INVESTIGATION  
INTO LEAN 5.0 ADOPTION PATTERNS WITHIN CORPORATE  
SETTING**

**RELATORE**

Prof. Maurizio Bevilacqua

**CANDIDATO**

Matteo Miccoli

**CORRELATORE**

Prof.ssa Laura Lucantoni

**A.A. 2025/2026**

# Indice

|                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Introduzione.....</b>                                                                     | <b>1</b>  |
| <br>                                                                                         |           |
| <b>Capitolo 1 Industry 4.0.....</b>                                                          | <b>4</b>  |
| <b>1.1 Introduzione all’Industry 4.0.....</b>                                                | <b>4</b>  |
| <b>1.2 Le Tecnologie abilitanti del Paradigma 4.0.....</b>                                   | <b>7</b>  |
| <b>1.3 Analisi critica del paradigma 4.0: Benefici, Limitazioni e Fattori Evolutivi.....</b> | <b>13</b> |
| <br>                                                                                         |           |
| <b>Capitolo 2 Industry 5.0.....</b>                                                          | <b>16</b> |
| <b>2.1 Introduzione all’Industry 5.0 e confronto tra 4.0 e 5.0.....</b>                      | <b>16</b> |
| <b>2.2 Principi e Obiettivi.....</b>                                                         | <b>20</b> |
| <b>2.2.1 La transizione verso l’approccio Umanocentrico (Human-Centricity).....</b>          | <b>20</b> |
| <b>2.2.2 La transizione verso la Sostenibilità (Sustainability).....</b>                     | <b>21</b> |
| <b>2.2.3 La transizione verso la Resilienza (Resilience).....</b>                            | <b>23</b> |
| <b>2.3 Tecnologie principali dell’Industry 5.0.....</b>                                      | <b>25</b> |
| <b>2.4 Lean 5.0.....</b>                                                                     | <b>28</b> |
| <b>2.4.1 Introduzione alla Lean 5.0.....</b>                                                 | <b>28</b> |
| <b>2.4.2 Cos’è la Lean 5.0.....</b>                                                          | <b>29</b> |
| <b>2.4.3 Vincoli e Parametri Operativi nei Domini DfX.....</b>                               | <b>32</b> |

|                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Capitolo 3 Analisi dello stato dell'arte nelle aziende italiane tramite interviste.....</b> | <b>38</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|

|                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.1 Metodologia di ricerca e strutturazione del campione aziendale.....</b>  | <b>38</b> |
| <b>3.1.1 Strutturazione delle interviste e aree di indagine.....</b>            | <b>39</b> |
| <b>3.1.2 Profilo dei campioni analizzati.....</b>                               | <b>46</b> |
| <b>3.1.3 Presentazione e discussione dei casi aziendali.....</b>                | <b>46</b> |
| <b>3.2 Analisi empirica e maturità dell'Industry 4.0.....</b>                   | <b>52</b> |
| <b>3.2.1 Applicazione nelle imprese di piccole dimensioni.....</b>              | <b>53</b> |
| <b>3.2.2 Applicazione nelle imprese di medie dimensioni.....</b>                | <b>54</b> |
| <b>3.2.3 Applicazione nelle imprese di grandi dimensioni.....</b>               | <b>55</b> |
| <b>3.3 Percezione e Livello di Transizione verso l'Industry 5.0.....</b>        | <b>56</b> |
| <b>3.3.1 Il divario nelle PMI.....</b>                                          | <b>56</b> |
| <b>3.3.2 Proattività e casi d'uso nelle grandi imprese.....</b>                 | <b>58</b> |
| <b>3.4 La convergenza tra i principi Lean, Industry 4.0 e Industry 5.0.....</b> | <b>59</b> |
| <b>3.4.1 Convergenza nelle Piccole Imprese.....</b>                             | <b>59</b> |
| <b>3.4.2 Convergenza nelle Medie Imprese.....</b>                               | <b>60</b> |
| <b>3.4.3 Convergenza nelle Grandi Imprese.....</b>                              | <b>61</b> |

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <b>Conclusioni.....</b>               | <b>62</b> |
| <b>Bibliografia e Sitografia.....</b> | <b>65</b> |
| <b>Ringraziamenti.....</b>            | <b>69</b> |

## **Indice delle Tabelle**

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tabella 1 – Profilo dei campioni analizzati.....</b>  | <b>46</b> |
| <b>Tabella 2 – Principali bisogni delle imprese.....</b> | <b>62</b> |

# Introduzione

Il mondo industriale è stato plasmato da molti shock nel corso degli anni, influenzando drasticamente il progresso dell'umanità. Oggi ricordiamo questi eventi come rivoluzioni industriali.

## **Prima Rivoluzione Industriale**

Segna una transizione dalla produzione manuale e dall'energia animale all'energia termica ricavata dal vapore e idraulica a partire dal 1760. La macchina a vapore fu l'invenzione più rivoluzionaria di questo periodo; essa era alimentata a carbone ed era capace di convertire l'energia termica in energia meccanica, venne utilizzata nelle industrie, dalle fonderie alle industrie tessili.

## **Seconda Rivoluzione Industriale**

La seconda rivoluzione avviene circa cento anni dopo la prima e andò ad impattare sulle telecomunicazioni, l'elettricità e il petrolio. In questa fase si stabilisce il concetto di produzione di massa.

## **Terza Rivoluzione Industriale**

La terza rivoluzione inizia nel periodo post-bellico intorno al 1960 ed è chiamata rivoluzione digitale. Riguarda i computer, le reti e Internet, oltre a un'automazione più avanzata. Dal punto di vista industriale ha avuto un enorme impatto sull'economia e sulla società andando a cambiare il modo in cui lavoriamo e viviamo. Si è passati così dal solido modello di produzione di massa a un modello più flessibile in cui i prodotti sono personalizzati per il consumatore. Grazie alle nuove tecnologie le aziende hanno iniziato ad operare a livello mondiale e trasferire produzione e competenze tra diversi paesi. Questo ha portato alla nascita di supply chain di livello internazionale che hanno un impatto molto positivo sull'economia globale.

## **Quarta rivoluzione industriale**

L'Industry 4.0 è anche conosciuta come la quarta rivoluzione industriale. Questa rivoluzione riguarda l'automazione delle aziende: macchine, sistemi e analisi dei dati in tempo reale sono tutti connessi. Infatti, l'aspetto cruciale è lo sviluppo di un ecosistema di comunicazione integrato (Machine-to-Machine, o M2M) in cui i dispositivi fisici cooperano e scambiano informazioni autonomamente. Questa transizione è anche una delle più significative per la digitalizzazione delle aziende nel futuro e cambierà per sempre il modo in cui viviamo e lavoriamo.

## **Industry 5.0**

L'Industry 5.0 integra l'attuale paradigma dell'Industria 4.0 mostrando come la ricerca e l'innovazione siano i veri motori della trasformazione da un'industria europea tradizionale a una sostenibile, incentrata sull'uomo e resiliente. Sposta l'attenzione dal valore per gli azionisti al valore per gli stakeholder ed è vantaggiosa per tutte le parti coinvolte. L'Industria 5.0 mira a catturare il valore delle nuove tecnologie, offrendo prosperità che trascende la creazione di posti di lavoro e la crescita economica, ma facendo ciò, mantiene la salute dei lavoratori al centro del processo produttivo e operando nel rispetto del pianeta.

## **Capitolo 1: Industry 4.0**

Il paradigma dell'Industry 4.0 non si limita all'adozione di singole tecnologie isolate, ma rappresenta una trasformazione strutturale nei modelli di business e nei processi produttivi, ridefinendo le prospettive di competitività e interconnettendo diverse catene del valore [1].

## 1.1 Introduzione all'Industry 4.0

Questo concetto affonda le sue radici storiche in Germania, dove il termine è stato coniato nel 2011 come progetto futuro e pilastro centrale della strategia ad alta tecnologia (*high-tech*) del Paese, destinato a essere adottato congiuntamente da imprese, comunità scientifica e decisori politici [2]. Questo modello è stato inizialmente sviluppato come uno strumento strategico per mantenere la capacità manifatturiera della Germania nei decenni a venire, ponendosi il macro-obiettivo economico di preservare stabile e in crescita l'occupazione nel settore produttivo. Fin dalle sue prime formulazioni, l'attenzione non era rivolta unicamente ai requisiti economici, ma includeva il soddisfacimento dei requisiti ecologici della cosiddetta "produzione verde" (*green production*), mirata a strutturare un'industria efficiente dal punto di vista energetico.

Nel 2013, l'Acatech (l'Accademia tedesca delle scienze ingegneristiche), su impulso del Ministero federale della ricerca (BMBF) e basandosi sulla *National Roadmap Embedded Systems*, ha presentato un'agenda di ricerca ufficiale contenente le principali raccomandazioni per l'implementazione del paradigma [3]. Tale documento descriveva l'impatto dirompente che l'Internet delle Cose (IoT) avrebbe esercitato sull'organizzazione industriale, inaugurando una nuova ondata di applicazioni digitali e una profonda interazione simbiotica tra uomo e macchina. L'impatto globale fu tale che già nel 2014 Deutsche Bank suggerì che l'adozione dell'Industry 4.0 avrebbe permesso alla Germania di posizionarsi come "l'allestitore di fabbriche del mondo". Successivamente, il professor Klaus Schwab, fondatore e presidente esecutivo del World Economic Forum, ne ha sancito la rilevanza scientifica internazionale, descrivendo l'Industry 4.0 come un cambio di paradigma fondamentalmente diverso dai precedenti concetti

industriali, storicamente caratterizzati da meri progressi tecnologici incrementali.

Dal punto di vista operativo, l'Industry 4.0 si qualifica per una sistematica digitalizzazione, automazione e connessione pervasiva dei sistemi produttivi, incorporando tecnologie innovative per migliorare le condizioni lavorative e aumentare la produttività e la qualità complessiva degli impianti. Questo ecosistema si articola strategicamente attorno al modello delle *smart factory*, le quali vengono convenzionalmente suddivise in tre componenti principali:

- **Smart production:** l'insieme delle nuove tecnologie che favoriscono la collaborazione stretta e sicura tra operatore, macchine e strumenti di lavoro;
- **Smart services:** le infrastrutture informatiche che integrano i sistemi produttivi e facilitano la cooperazione sinergica tra le aziende (fornitori e clienti) e le strutture logistiche esterne (hub territoriali, reti di trasporto, gestione dei flussi di scarto);
- **Smart energy:** un approccio ingegneristico orientato all'efficienza energetica, volto a migliorare le performance di impianto riducendo gli sprechi di risorse.

Per abilitare concretamente questa trasformazione, il settore industriale si affida all'implementazione dei Sistemi Cyber-Fisici (CPS, *Cyber-Physical Systems*), ovvero piattaforme in cui asset fisici e componenti digitali computazionali sono strettamente integrati per generare un sistema autonomo, interconnesso e intelligente. L'elemento distintivo della quarta rivoluzione risiede proprio nell'interconnessione totale tra i vari elementi della fabbrica; di conseguenza, ottimizzare i livelli e i protocolli comunicativi diventa un requisito fondamentale per operare secondo i nuovi standard industriali.

L'efficacia complessiva del modello risiede nella capacità di far cooperare i diversi livelli della struttura aziendale, trasformando i dati grezzi raccolti sul campo in informazioni strategiche per il *decision-making* e l'efficienza operativa. I principali vantaggi derivanti da questa digitalizzazione dei processi possono essere riassunti in tre macro-aree di impatto:

- **Efficienza operativa e manutentiva:** L'automazione dei processi ripetitivi riduce drasticamente l'errore umano, innalzando lo standard qualitativo del prodotto. Parallelamente, l'integrazione di sensori IoT permette un monitoraggio in tempo reale degli asset; l'analisi continua di questi dati sblocca la manutenzione predittiva, consentendo di intercettare i guasti prima che si verifichino e azzerando i costi legati ai fermi macchina imprevisti.
- **Flessibilità della Supply Chain:** La visibilità dei dati lungo l'intera catena del valore permette una pianificazione *just-in-time* estremamente accurata, ottimizzando i livelli di inventario e riducendo le scorte di sicurezza. Questa reattività logistica si traduce nella capacità di realizzare la cosiddetta *mass customization* (personalizzazione di massa), riconfigurando rapidamente le linee produttive per soddisfare le richieste specifiche del cliente finale su ampia scala.
- **Sostenibilità, Tracciabilità e Sicurezza:** Una gestione guidata dai dati (*data-driven*) permette di allocare materiali ed energia con precisione millimetrica, supportando la sostenibilità ambientale del business. Inoltre, l'adozione di robot collaborativi (*cobot*) mitiga i rischi per l'operatore nelle mansioni più usuranti, mentre la digitalizzazione documentale garantisce la totale tracciabilità e trasparenza della filiera, a vantaggio del controllo qualità e della competitività sul mercato globale.

## **1.2 Le Tecnologie abilitanti del Paradigma 4.0**

Sebbene i principi dell'Industry 4.0 delineino una trasformazione radicale dei sistemi industriali, la loro concreta traduzione operativa dipende dall'adozione di specifiche tecnologie abilitanti (enabling technologies). L'integrazione di questi strumenti non deve essere intesa come una mera somma di componenti hardware e software, ma come un ecosistema sinergico capace di ridefinire la catena del valore e l'efficienza dei sistemi produttivi, con un impatto profondo sulle dinamiche del tessuto industriale italiano [4]. Non tutti i sistemi tecnologici presentano la medesima maturità: mentre alcune soluzioni risultano già consolidate e capillarmente diffuse, altre richiedono un complesso processo di trasferimento tecnologico dalla ricerca scientifica alla produzione su scala industriale. A questo proposito, la classificazione classica elaborata da Boston Consulting Group (BCG) identifica nove pilastri di innovazione tecnologica, i quali cooperano sinergicamente per attuare la transizione digitale [6].

### **1. Internet delle Cose (Industrial Internet of Things - IIoT)**

L'Internet delle Cose (IoT) definisce la capacità di oggetti ed elementi fisici della produzione di connettersi alla rete informatica. In ambito manifatturiero, l'Industrial IoT (IIoT) si traduce nell'integrazione di elettronica, software, sensori e attuatori all'interno dei dispositivi di fabbrica, i quali acquisiscono un'identità digitale e la capacità di comunicare in tempo reale. I dati raccolti sul campo permettono il monitoraggio e il controllo remoto degli asset da parte degli operatori. L'interconnessione delle macchine lungo la linea produttiva sblocca due vantaggi strategici: da un lato, consente l'analisi continua delle performance delle apparecchiature; dall'altro, abilita un canale di comunicazione bidirezionale con i clienti (tramite recensioni e piattaforme

web), permettendo di intercettare tempestivamente anomalie qualitative sul prodotto finito e di riconfigurare la linea di produzione in tempo reale per correggere il difetto prima che generi disservizi su scala globale.

## **2. Big Data e Analytics**

Strettamente legato all'infrastruttura IIoT è il pilastro dei Big Data, incentrato sulla raccolta, archiviazione ed elaborazione di ingenti volumi di dati eterogenei provenienti da molteplici fonti aziendali. La gestione dei Big Data si articola tradizionalmente attorno alle "tre V":

- **Volume:** la generazione di massicce quantità di dataset da sensori, log di sistema, transazioni e canali web;
- **Velocità:** il flusso continuo e in tempo reale con cui i dati devono essere acquisiti e processati;
- **Varietà:** la coesistenza di dati strutturati (database tradizionali) e non strutturati (file audio, video, stringhe di testo).

La sfida attuale risiede nella conversione dei *big data* in *smart data*, ovvero in informazioni strategiche ad alto valore aggiunto. Tale transizione è operata mediante le *Big Data Analytics*, tecniche analitiche avanzate che consentono al management aziendale di prendere decisioni più rapide, accurate e predittive, basate su metriche precedentemente opache o non disponibili.

## **3. Simulazione e Digital Twin**

La simulazione si evolve dalla classica progettazione statica per estendersi a tutti i processi operativi, consentendo di modellare un sistema reale all'interno di un ambiente digitale controllato e ripetibile. Attraverso l'elaborazione dei dati raccolti in tempo reale, i moderni sistemi di simulazione non solo ottimizzano i parametri di funzionamento di macchine e prodotti, ma sono in grado di prevedere l'insorgenza di varie varianti e derive di processo prima che si verifichino. La massima espressione di questo pilastro è il Gemello Digitale (*Digital Twin*): una replica virtuale ad altissimo livello di dettaglio di un'entità

fisica (un prodotto, una macchina o un intero stabilimento). Alimentato costantemente dai sensori posti sulla controparte reale, il *Digital Twin* si adatta dinamicamente ai cambiamenti di quest'ultima, permettendo di effettuare test, validazioni e configurazioni in ambiente virtuale e di procedere alla realizzazione fisica solo a progetto ottimizzato.

#### **4. Cloud Computing**

L'architettura informativa dell'Industry 4.0 richiede una condivisione dei dati pervasiva, rendendo le applicazioni di controllo e gestione della produzione accessibili a tutti gli attori della catena del valore. Il Cloud Computing fornisce l'infrastruttura tecnologica necessaria per archiviare ed elaborare i dati all'interno di strutture virtualizzate, garantendo accessi simultanei e sicuri a utenti e sistemi diversi. In ambito industriale si distingue tra due configurazioni logiche:

- **Cloud Privato:** infrastruttura IT dedicata esclusivamente a una singola organizzazione, altamente personalizzata sulle sue esigenze specifiche. L'hardware può risiedere fisicamente nei locali aziendali (*on-premise*) o essere gestito in *outsourcing* da terze parti;
- **Cloud Pubblico:** piattaforma erogata da un fornitore di servizi esterno che ospita i dati aziendali sui propri server, offrendo scalabilità e flessibilità architetturale senza richiedere investimenti in infrastrutture fisiche locali.

#### **5. Cybersicurezza (Cybersecurity)**

L'apertura delle reti industriali e la proliferazione di dispositivi interconnessi aumentano sensibilmente la superficie di attacco esposta a potenziali minacce informatiche. La Cybersicurezza si configura pertanto come il pilastro difensivo volto a proteggere computer, server, reti, sistemi di comunicazione e dati operativi da malware e accessi non autorizzati. Sebbene la progettazione e il mantenimento di un'architettura di sicurezza robusta comportino significativi

investimenti in termini economici e di tempo, la creazione di un sistema resiliente rappresenta un asset fondamentale per garantire la continuità aziendale (*business continuity*) in un panorama globale caratterizzato da attacchi informatici sempre più frequenti e sofisticati.

## **6. Realtà Aumentata (Augmented Reality)**

I sistemi di Realtà Aumentata (AR) arricchiscono la percezione del mondo fisico sovrapponendo a esso informazioni multimediali e dati digitali in tempo reale, attraverso l'utilizzo di dispositivi dedicati quali smartphone, visori a proiezione retinica, auricolari e guanti tattili. A differenza della Realtà Virtuale (VR), che isola l'operatore immergendolo in un ambiente completamente digitale che sostituisce i cinque sensi naturali, la realtà aumentata mantiene il legame con l'ambiente circostante. Nei contesti produttivi, l'AR ottimizza i processi comunicativi e operativi, supportando il personale durante le attività di manutenzione, assemblaggio o logistica. L'architettura software si basa su un modello spaziale in grado di mappare il contesto reale, determinare la posizione esatta dell'operatore e garantire il corretto allineamento geometrico dei contenuti virtuali sovrapposti.

## **7. Robot Autonomi e Collaborativi (Cobot)**

La robotica industriale classica definisce macchine fisse o mobili, dotate di molteplici gradi di libertà, programmate automaticamente e riprogrammabili per eseguire compiti ripetitivi o gravosi, replicando o sostituendo l'azione umana in ambienti complesso. L'innovazione dell'Industry 4.0 risiede nell'introduzione dei Robot Collaborativi o *Cobot*. Si tratta di sistemi cinematici leggeri e flessibili progettati per operare a stretto contatto con l'uomo, senza la necessità di barriere fisiche o gabbie di protezione. Per garantire l'incolumità dei lavoratori in conformità con gli standard di sicurezza, i cobot integrano:

- Sistemi di ridondanza hardware e software;
- Algoritmi di limitazione di forza e velocità;

- Sensori di coppia dedicati, sistemi di visione avanzati e pelli capacitive;
- Elementi strutturali alleggeriti, giunzioni arrotondate e rivestimenti plastificati per assorbire l'energia cinetica in caso di contatto accidentale.

L'adozione dei cobot migliora significativamente l'ergonomia delle postazioni di lavoro, consente l'impiego della manodopera in compiti a maggior valore aggiunto, semplifica le procedure di programmazione e incrementa la flessibilità del layout produttivo.

## **8. Integrazione dei Sistemi (Orizzontale e Verticale)**

L'integrazione dei dati e dei sistemi mira a connettere i dipartimenti e le funzioni aziendali per superare la frammentazione informativa, unificando l'organizzazione. Questa connettività si sviluppa lungo due assi direzionali:

- **Integrazione Verticale:** si sviluppa all'interno della struttura gerarchica aziendale, connettendo i sistemi informativi dal livello di campo (linee di produzione, PLC, SCADA) fino ai livelli decisionali e strategici del top management (MES, ERP). Questa fluidità riduce drasticamente i tempi morti tra l'acquisizione del dato sul campo e il processo decisionale strategico;
- **Integrazione Orizzontale:** definisce l'integrazione tra attori esterni alla singola azienda, connettendo digitalmente fornitori, distributori e partner logistici all'interno della medesima catena del valore. Attraverso piattaforme cloud condivise, un fornitore può conoscere in tempo reale il fabbisogno di materie prime dello stabilimento, o un costruttore di macchinari può monitorare i parametri operativi per coordinare interventi di manutenzione predittiva. Nei modelli più evoluti, l'integrazione orizzontale raggiunge il cliente finale, il quale può configurare e ordinare un prodotto personalizzato (*mass customization*) direttamente interconnesso con le macchine della linea produttiva.

## **9. Manifattura Additiva (Additive Manufacturing)**

La manifattura additiva comprende l'insieme dei processi industriali che consentono la creazione di oggetti tridimensionali a partire da un modello CAD digitale, depositando il materiale (polimeri, metalli o ceramiche) strato su strato. Questa tecnologia, la cui applicazione principale è rappresentata dalle stampanti 3D, inverte l'approccio delle tecniche di lavorazione tradizionali sottrattive, come la fresatura o la tornitura su macchine a Controllo Numerico Computerizzato (CNC), basate sull'asportazione di truciolo da un blocco pieno. Rispetto alle macchine CNC ad assi multipli (5 o 6 assi), la stampa 3D riduce drasticamente la produzione di scarti di materiale e mitiga i rischi operativi legati alle alte temperature e alla generazione di schegge metalliche durante le lavorazioni. Sebbene sia storicamente relegata alla prototipazione rapida, nell'Industry 4.0 la manifattura additiva si afferma come tecnologia di produzione per piccoli lotti altamente personalizzati. Inoltre, la possibilità di distribuire i centri di stampa 3D sul territorio permette di produrre i componenti in prossimità dei mercati di sbocco, riducendo le distanze e i costi legati al trasporto della logistica distributiva.

### **1.3 Analisi Critica del Paradigma 4.0: Benefici, Limitazioni e Fattori Evolutivi**

Il paradigma dell'Industria 4.0 non riguarda esclusivamente il settore manifatturiero, ma si configura come una rivoluzione trasversale che abbraccia molteplici comparti economici, guidando la digitalizzazione dei processi attraverso l'adozione di nuove tecnologie. Da una prospettiva a lungo termine, tali innovazioni contribuiranno a creare un ambiente di produzione completamente automatizzato e interconnesso, capace di comunicare

autonomamente con altri sistemi, monitorare le proprie prestazioni e configurarsi dinamicamente in base alle esigenze operative.

In questo contesto, il principale vantaggio dell'Industria 4.0 risiede nella capillare disponibilità e accessibilità dell'informazione per tutti i soggetti coinvolti lungo la catena del valore. In qualsiasi momento è possibile accedere ai flussi di dati e analizzarli per prendere decisioni informate, ottimizzando l'efficienza della linea di business. L'interconnessione tra risorse umane, beni fisici e sistemi informativi favorisce la riduzione dei costi operativi, la trasparenza informativa e il coordinamento strategico dei flussi.

L'adozione dei metodi e delle tecnologie abilitanti nella quarta rivoluzione industriale introduce benefici immediati, tra cui:

- Personalizzazione di massa e orientamento al cliente: La raccolta di dati sul campo e l'impiego di sistemi di produzione agili consentono la personalizzazione dei prodotti in base alle esigenze specifiche dei singoli clienti, anticipando le tendenze e le necessità del mercato;
- Efficienza nell'allocazione delle risorse: L'ottimizzazione dei processi incrementa i volumi di produzione riducendo al minimo lo spreco di materie prime ed energia. Il miglioramento qualitativo dei prodotti e la contrazione dei costi di trasformazione operativa si traducono direttamente in una maggiore marginalità aziendale;
- Flessibilità operativa ed economie di scala: L'automazione flessibile consente la produzione di piccoli lotti (fino al singolo lotto unitario) a costi unitari analoghi a quelli tipici della produzione su larga scala;
- Sviluppo di nuovi modelli di business: La digitalizzazione sta trasformando le catene del valore tradizionali. Le aziende possono integrare tecnologie digitali al prodotto fisico per erogare servizi avanzati

e a valore aggiunto (servitizzazione), promuovendo una più profonda interazione con l'utente finale.

Di contro, lo svantaggio principale e la barriera d'ingresso più significativa all'Industria 4.0 è rappresentata dall'elevata intensità di capitale richiesta nel breve termine. L'implementazione di queste architetture esige investimenti finanziari significativi (CAPEX), i cui benefici e la cui redditività si manifestano prevalentemente nel medio-lungo termine. Inoltre, la natura digitale di questa trasformazione evidenzia un forte divario culturale e generazionale all'interno delle organizzazioni, rendendo necessaria una formazione continua del personale nei settori dell'IT e della data analytics per sfruttare appieno il potenziale tecnologico.

La limitazione più profonda dell'Industria 4.0 risiede, tuttavia, nella disconnessione emersa tra i suoi presupposti teorici e l'effettiva implementazione pratica nei primi dieci anni di applicazione. Sebbene i piani originali formulati in Germania nel 2011 ponessero l'accento sulla stabilità occupazionale e sulle esigenze ecologiche della "produzione verde", nella pratica il comparto industriale ha progressivamente ridotto il paradigma a un concetto puramente tecnocentrico. L'attenzione si è concentrata quasi esclusivamente sulla digitalizzazione massiva e sull'adozione di tecnologie guidate dall'Intelligenza Artificiale (AI-driven) volte a incrementare l'efficienza quantitativa e la flessibilità dei sistemi di produzione, lasciando in secondo piano i principi di equità sociale e sostenibilità ambientale che inizialmente ne avevano ispirato lo sviluppo.

Questa deriva ha spinto i decisori politici e la comunità scientifica a ridefinire le priorità industriali attraverso la formulazione dell'Industria 5.0. Questa transizione non si configura come un rifiuto delle tecnologie abilitanti del 4.0, quanto piuttosto come un loro riorientamento strategico. L'Industria 5.0 si

concentra su un modello differente di ricerca e innovazione tecnologica, volto non solo alla massimizzazione del profitto economico a breve termine, ma focalizzato sul benessere a lungo termine dell'umanità e sul rigoroso rispetto dei limiti planetari (planetary boundaries).

## **Capitolo 2 Industry 5.0**

L'industry 5.0 è un cambiamento volto a creare un equilibrio tra sostenibilità, efficienza e creatività umana, molto diverso dalle precedenti prevalentemente tecnologiche. Attraverso la industry 5.0 le aziende potranno rispondere meglio alle esigenze dei clienti e della società nel suo complesso [7].

## **2.1 Introduzione all'Industry 5.0 e confronto tra 4.0 e 5.0**

Il concetto di Industria 5.0 è stato formalmente lanciato nel gennaio 2021 sul fronte scientifico e istituzionale dal rapporto programmatico della Commissione Europea "Industria 5.0 - Verso un'industria europea sostenibile, incentrata sull'uomo e resiliente" [8]. Questo nuovo paradigma non è una rottura radicale rispetto al precedente modello di Industria 4.0 e non è un'alternativa o un rifiuto delle sue scoperte. È un'evoluzione e una continuazione logica su basi filosofiche diverse.

Per comprendere appieno questa transizione, dobbiamo guardare indietro all'ultimo decennio. L'Industria 4.0 (originariamente in Germania nel 2011 come iniziativa high-tech) è orientata all'integrazione tra il mondo fisico e quello virtuale attraverso sistemi ciber-fisici (CPS) e l'interconnessione globale tramite l'Internet delle Cose (IoT). L'obiettivo principale di questa prima ondata digitale era la quantificazione e l'ottimizzazione dell'efficienza operativa e della flessibilità all'interno delle catene del valore, e fu adottato un approccio guidato dalla tecnologia. In questa visione, lo sviluppo industriale era guidato da macchine e algoritmi dell'impianto e il capitale umano era subordinato al ritmo della digitalizzazione.

L'Industria 5.0 è nata per invertire questo percorso tecnocentrico e per stabilire una prospettiva sociale ed ecologica (basata sui valori). La Commissione Europea e la comunità di ricerca internazionale hanno riconosciuto che la crescita economica e l'occupazione dell'industria non sono l'unico modo in cui possono svilupparsi, ma dovrebbero essere un elemento vitale della prosperità

a lungo termine dell'intera società [7]. In merito alle metriche di successo aziendale, il paradigma 5.0 combina le forze competitive tradizionali con i tre pilastri della sostenibilità sociale, ambientale ed economica, richiamando nuovamente il Triple Bottom Line [8].

La transizione dall'Industria 4.0 all'Industria 5.0 è radicale, influenzando gli obiettivi strategici e ingegneristici al cuore di tutti gli aspetti del business. Il modello precedente si concentrava sull'efficienza e sulle catene integrate a livello globale in una prospettiva Just-in-Time, mentre l'Industria 5.0 vuole trovare l'equilibrio strategico tra produttività e benessere e resilienza del sistema attraverso reti cooperative riconfigurabili e stabili. E anche gli algoritmi stanno evolvendo: dall'Intelligenza Artificiale, focalizzata sull'analisi della pura correlazione e sull'automazione rigida dei compiti, alla logica causale e all'intelligenza dello sciame e al supporto decisionale avanzato.

Nell'Industria 4.0, la domanda fondamentale posta da progettisti e manager aziendali era sulle capacità strumentali: "Cosa è possibile fare o automatizzare introducendo questa nuova tecnologia?" L'Industria 5.0 ribalta completamente questa prospettiva assiologica e chiede "Come può questa specifica tecnologia supportare il lavoratore e portare benefici ecologici e sociali all'ecosistema aziendale?" La tecnologia, quindi, non è più l'obiettivo finale dell'innovazione ed è trasformata in un mezzo per servire i bisogni umani: per fare del lavoratore un asset e un beneficiario del sistema (centralità dell'uomo).

Il quadro mostra anche una profonda convergenza metodologica con la matrice filosofica della Società 5.0, un manifesto di innovazione giapponese. Questo cambio di rotta non si limita esclusivamente ai confini del perimetro di fabbrica, ma mostra una profonda convergenza metodologica e valoriale con il più ampio

manifesto evolutivo della *Society 5.0*, volto a integrare la digitalizzazione avanzata per la risoluzione di complessi problemi macro-sociali [5]. La Società 5.0 propone di creare una "società super-intelligente" che possa integrare la digitalizzazione avanzata (Big Data, Intelligenza Artificiale, Blockchain) nella vita quotidiana della popolazione, non solo per scopi economici ma per risolvere complessi problemi macro-sociali (ad esempio, invecchiamento demografico, efficienza energetica, sostenibilità urbana). Nel dominio della fabbrica e del piano di produzione, questa visione si traduce in un miglioramento delle prestazioni umane. Le tecnologie di frontiera non sono destinate a eliminare il lavoro per evitare l'errore umano per le prestazioni umane nel futuro; sono destinate a migliorare la creatività umana, le capacità analitiche e le capacità di risoluzione creativa dei problemi.

L'obiettivo dell'Industry 5.0 è creare una relazione simbiotica uomo-macchina. In questo modo, la collaborazione è una risposta ai requisiti etici ed è anche una risposta alle precise e rigorose esigenze del mercato manifatturiero odierno. In particolare, la gestione dei mercati con variabilità estrema della domanda (che richiede personalizzazione di massa a prezzi elevati) e la mancanza di personale tecnico altamente specializzato è un esempio di ciò. Ad esempio, nel caso di processi di gestione critici e altamente complessi come la saldatura molto complessa o gli impianti, l'introduzione di sistemi intelligenti e collaborativi può aiutare nella correzione delle competenze e dei livelli di sicurezza e trasformare il vecchio lavoro in lavori sani e sicuri. Questa è la realtà dell'Industria 5.0, quindi è un imperativo storico, economico e manageriale importante per garantire la competitività e la sopravvivenza del tessuto industriale moderno entro i confini ecologici del mondo.

In Italia per incentivare lo sviluppo dell'Industry 5.0 sono stati anche utilizzati dei sussidi, in particolare si cita Il Piano Transizione 5.0, in complementarità

con il Piano Transizione 4.0, che si inserisce nell'ambito della più ampia strategia finalizzata a sostenere il processo di trasformazione digitale ed energetica delle imprese e mette a disposizione delle stesse, nel biennio 2024-2025, 12,7 miliardi di euro.

In particolare, in linea con le azioni di breve e medio periodo previste dal piano REPowerEU, Transizione 5.0, con una dotazione finanziaria complessiva pari a 6,3 miliardi di euro, si pone l'obiettivo di favorire la trasformazione dei processi produttivi delle imprese, rispondendo alle sfide poste dalle transizioni gemelle, digitale ed energetica [10].

## **2.2 Principi e Obiettivi**

### **2.2.1 La transizione verso l'approccio Umanocentrico (Human-Centricity)**

Il passaggio dal paradigma dell'Industria 4.0 al paradigma dell'Industria 5.0 cambia il ruolo dell'operatore nei processi industriali, evolvendo da una visione in cui l'essere umano è un semplice gestore tecnologico a una prospettiva centrata sull'uomo. In quest'ottica, l'Associazione Internazionale di Ergonomia (IEA) categorizza l'ergonomia in tre macro-domini — fisico, cognitivo e organizzativo — che oggi possono essere direttamente adattati e sviluppati grazie alle nuove tecnologie abilitanti.

L'ergonomia fisica studia la risposta del corpo umano alle richieste fisiche e biomeccaniche. Nei moderni contesti produttivi, l'obiettivo è minimizzare lo sforzo biomeccanico e ottimizzare la logistica interna, in particolare riducendo i disturbi muscoloscheletrici associati a mansioni ad alta usura. Quest'area è fortemente supportata da esoscheletri industriali per il supporto posturale,

nonché da sensori edge per la cinematica del movimento in grado di monitorare e correggere i fattori di rischio ergonomico in tempo reale.

L'ergonomia cognitiva si concentra sui processi mentali — inclusi percezione, memoria e ragionamento — coinvolti nell'interazione uomo-macchina. Man mano che gli impianti diventano più complessi, l'attenzione si sposta sul carico mentale (carico cognitivo) dell'operatore per costruire una relazione di fiducia ed efficacia con i sistemi robotici. Lo sviluppo tecnologico si concentra su vettori specifici: la Realtà Virtuale (VR) e la Realtà Aumentata (AR) sono utilizzate come strumenti di formazione immersiva e come interfacce operative per la riduzione degli errori, mentre gli algoritmi di Intelligenza Artificiale supportano le decisioni basate su processi di apprendimento dinamico, minimizzando lo stress associato al processo decisionale.

Infine, l'ergonomia organizzativa riguarda le regole di progettazione, i layout e l'ottimizzazione del flusso di lavoro dei sistemi socio-tecnici. A livello di reparto produttivo, ciò si realizza attraverso modelli di collaborazione flessibili, in cui i meccanismi di condivisione del lavoro e i feedback sul posto di lavoro consentono agli operatori e ai sistemi di automazione di cooperare in sicurezza. Il monitoraggio integrato di queste tre dimensioni permette di superare la tradizionale dicotomia tra produttività e benessere, ponendo le basi per un sistema produttivo sostenibile e resiliente [11] [12].

### **2.2.2 La transizione verso la Sostenibilità (Sustainability)**

L'adozione delle nuove tecnologie e la strutturazione di modelli di business sostenibili richiedono l'implementazione e la governance degli *smart data*. La progettazione di tali modelli impone una profonda comprensione degli effetti di rimbalzo (*rebound effects*) e dell'impatto ambientale, sociale ed economico dell'impresa, secondo i criteri della *Triple Bottom Line* [13]. La sfida principale risiede nel bilanciare la redditività economica con i benefici ecologici e sociali, riconfigurando processi e risorse aziendali attraverso un approccio multidimensionale. In questo contesto, i modelli di eccellenza aziendale come

L'EFQM si sono evoluti allineandosi direttamente con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite (SDGs), integrando le metriche di performance organizzativa con la trasformazione digitale.

La letteratura scientifica conferma l'impatto positivo delle tecnologie digitali sulle performance complessive: l'introduzione di architetture evolute incrementa la capacità produttiva, la velocità di risposta al mercato, la qualità del prodotto e la redditività, riducendo contestualmente i costi operativi. Un vettore critico per la sostenibilità è rappresentato dall'efficientamento energetico dei sistemi d'impianto. Le tecnologie digitali presentano una duplice natura energetica: se da un lato richiedono energia per l'alimentazione delle infrastrutture IT, dall'altro offrono gli strumenti analitici per ottimizzare i consumi dell'intera *supply chain*. L'analitica dei flussi di dati in tempo reale permette di mappare i picchi di assorbimento e minimizzare gli sprechi energetici, integrando criteri ecologici e sociali nella stessa fase di selezione degli asset industriali.

Sotto il profilo dei flussi informativi, un aspetto cruciale è l'eliminazione del cosiddetto spreco logistico di informazioni (*information logistical waste*). Le inefficienze legate al trattamento dei dati si articolano in tre fasi distinte: generazione e trasferimento, elaborazione, archiviazione e utilizzo. In fase di generazione, l'obiettivo gestionale segue il principio del "raccogliere quanto necessario e il meno possibile", valutando accuratamente l'origine e il significato delle metriche. I colli di bottiglia e i tempi di attesa legati all'indisponibilità dei dati in tempo reale generano ritardi che si propagano sui processi fisici. La digitalizzazione mira ad azzerare le attività manuali di *data entry* e la documentazione cartacea, poiché il miglioramento continuo può essere conseguito esclusivamente attraverso l'interconnessione e l'analisi predittiva dei dataset aziendali.

I dati empirici quantificano i benefici derivanti dalle tecnologie digitali applicate alla sostenibilità energetica: la letteratura rileva riduzioni dei consumi energetici stimabili tra il 10% e il 30% grazie alla realtà aumentata e all'*additive manufacturing*, mentre l'adozione di architetture di *cloud computing*, Big Data e *analytics* consente contrazioni globali dei consumi energetici di stabilimento comprese tra l'11% e il 14%. L'Industry 5.0 introduce, inoltre, il tema fondamentale dell'uso etico della tecnologia, un concetto strettamente interconnesso con l'umanocentrismo. Rispetto alle derive tecnocentriche in cui l'operatore era subordinato ai ritmi della macchina, l'approccio dell'Industry 5.0 inverte la gerarchia assiologica, ponendo il lavoratore al di sopra dell'algoritmo. Il focus strategico si sposta dalla domanda classica su cosa sia possibile fare tramite una nuova tecnologia all'indagine su come tale strumento possa supportare e valorizzare l'attività umana all'interno della fabbrica.

### **2.2.3 La transizione verso la Resilienza (Resilience)**

La resilienza, intesa come la capacità di un sistema di resistere, assorbire e superare perturbazioni o eventi esogeni catastrofici, rappresenta un pilastro essenziale all'interno dei modelli industriali moderni [8]. Sebbene la letteratura si concentri prevalentemente sulla resilienza tecnologica delle infrastrutture, la componente umana rimane il fattore critico di successo. Gli operatori sul campo costituiscono il primo presidio per il rilevamento delle anomalie di processo; di conseguenza, la formazione, l'addestramento continuo, la consapevolezza operativa e la gestione strategica delle risorse umane (HRM) risultano determinanti per sviluppare routine organizzative resilienti.

La resilienza organizzativa si configura come un costrutto multidisciplinare governato da fattori interni ed esterni. Essa implica la capacità di comprendere il contesto, adattarsi tempestivamente alle nuove condizioni operative e gestire

le vulnerabilità sistemiche attraverso pratiche e routine flessibili. Tra i fattori interni, il *risk management* gioca un ruolo centrale attraverso piani di contingenza e tecniche di prevenzione, supportati dalla visibilità e dalla trasparenza delle informazioni lungo la filiera. L'implementazione delle tecnologie abilitanti permette di tracciare i flussi informativi in tempo reale, offrendo un supporto strategico alla continuità operativa, a condizione che ogni tecnologia sia integrata valutando attentamente i benefici organizzativi apportati.

La transizione digitale ha introdotto severe sfide in termini di sicurezza e robustezza dei sistemi informativi. Il *cloud computing* offre un modello architetturale scalabile e flessibile su richiesta, ma l'integrazione dei dati attraverso i diversi livelli industriali rimane complessa. L'architettura si articola su tre assi di integrazione: verticale (all'interno dei sistemi di fabbrica), *end-to-end* (lungo il ciclo di vita del prodotto) e orizzontale (attraverso le reti collaborative e le catene di fornitura). Le recenti crisi globali hanno evidenziato la vulnerabilità strutturale delle *supply chain* tradizionali; in questo scenario, le reti collaborative decentralizzate si configurano come strutture emergenti capaci di sostituire i nodi logistici interrotti, incrementando la resilienza del comparto manifatturiero.

Per completare tale integrazione è necessario evolvere i tradizionali sistemi informativi isolati verso piattaforme intelligenti ed ecosistemiche. Tali ambienti, caratterizzati da elevati tassi di trasmissione dati e requisiti computazionali intensivi, possono presentare criticità legate alla saturazione delle risorse hardware e alla sicurezza informatica. Per risolvere il deficit di fiducia nello scambio di dati critici, la tecnologia Blockchain offre un solido supporto all'infrastruttura IoT, garantendo transazioni sicure all'interno di reti tracciabili.

I principali contributi della blockchain alla resilienza industriale si articolano su quattro direttrici strategiche [14]. In primo luogo, garantisce una resilienza nativa: l'architettura decentralizzata *peer-to-peer* elimina i singoli punti di vulnerabilità (*single point of failure*), configurando un registro durevole e immutabile. In secondo luogo, assicura la scalabilità, in quanto la capacità computazionale della rete aumenta in modo proporzionale all'ingresso di nuovi nodi nel network. Sotto il profilo della sicurezza crittografica, l'immutabilità delle transazioni garantisce la totale verificabilità dei flussi, azzerando le controversie informative. Infine, promuove l'autonomia operativa: gli *smart contract* consentono ai componenti del sistema ciber-fisico (CPS) di eseguire transazioni e scambi di informazioni in modo autonomo, associando a ciascun asset un'identità digitale univoca e sicura. L'adozione di tali architetture deve essere valutata analiticamente da ogni organizzazione in base alle specifiche esigenze di scambio dati, sicurezza dei pagamenti strutturali e capacità di archiviazione, bilanciando l'innovazione tecnologica con i reali obiettivi di flessibilità e resilienza del sistema produttivo.

## 2.3 Tecnologie principali dell'Industry 5.0

Le tecnologie abilitanti dell'Industry 5.0 costituiscono l'architettura digitale, informativa e operativa (*Operations Technologies* - OT) necessaria per tradurre in soluzioni industriali concrete i tre pilastri dell'umanocentrismo, della sostenibilità e della resilienza. Questo ecosistema tecnologico si articola in due macro-cluster complementari:

- **Le tecnologie facilitatrici (*facilitating technologies*):** Rappresentano l'infrastruttura di base ereditata dall'Industria 4.0 (quali *Big Data analytics*, *cloud computing*, sistemi ERP e MES). Esse costituiscono i

moduli fondamentali e interconnessi per la gestione dei flussi informativi aziendali.

- **Le tecnologie emergenti (*emerging technologies*):** Costituiscono le innovazioni più dirompenti (*disruptive*) che si innestano sulle infrastrutture preesistenti. Il loro obiettivo non è la mera automazione tecnocentrica, ma la riconfigurazione dei metodi di creazione del valore in chiave ecocompatibile, etica e antropocentrica.

La letteratura scientifica identifica nove tecnologie emergenti chiave a supporto degli obiettivi core dell'Industry 5.0 :

1. **Sistemi Ciber-Fisici Cognitivi (Cognitive Cyber-Physical Systems - C-CPS):** Evoluzione dei tradizionali CPS, queste architetture integrano la cognizione umana e un avanzato grado di consapevolezza di macchina. Il classico ciclo *sense-plan-act* viene sostituito dal modello dinamico **sense-analyze-compute-act**. Grazie alle proprietà sistemiche di auto-conoscenza, auto-monitoraggio, auto-consapevolezza e auto-informazione, i C-CPS rilevano pattern complessi, prevengono i guasti e supportano un *decision-making* proattivo, garantendo un'interazione uomo-macchina fluida e sicura.
2. **Intelligenza Artificiale Cognitiva (Cognitive Artificial Intelligence - CAI):** Integrazione sinergica tra l'IA e i modelli di coscienza artificiale. Elaborando informazioni esplorative, linguaggio naturale (NLP) e *data mining*, la CAI permette alle macchine di comprendere il contesto reale, pensare e ri-apprendere con logiche antropomorfe. Questo abilita l'emergenza di **architetture di IA auto-riparanti (*self-healing AI*)** capaci di adattarsi autonomamente alle variazioni di processo, riducendo

il sovraccarico informativo (*information overload*) e minimizzando i tassi di errore.

3. **Tecnologie di Interazione e Riconoscimento Umano (Human Interaction and Recognition Technologies - HIRT):** Fondamentali per il pilastro dell'umanocentrismo, le HIRT interconnettono in modo ottimale l'operatore e la macchina per rendere i compiti fisici e cognitivi più sicuri, snelli e confortevoli. Comprendono la robotica guidata da sistemi di visione, la *sensor fusion*, la triangolazione dei dati sensoriali e gli algoritmi adattivi di predizione delle intenzioni e delle traiettorie umane. Operano in stretto coordinamento con la CAI e l'edge computing per interpretare e adattarsi a condizioni di lavoro mutevoli.
4. **Realtà Estesa (Extended Reality - XR):** Termine ombrello che unisce le tecnologie immersive di Realtà Aumentata (AR), Virtuale (VR) e Mista (MR). Nel contesto industriale, la XR supporta l'operatore attraverso l'addestramento avanzato in ambienti immersivi a rischio zero, la visualizzazione di KPI e la diagnostica rapida dei guasti in tempo reale. Grazie alla sinergia con le reti 6G e l'edge computing, vengono superate le storiche limitazioni di calcolo e connettività.
5. **Dispositivi Indossabili Intelligenti Industriali (Industrial Smart Wearables - ISW):** Strumenti cruciali per la sicurezza e la produttività della forza lavoro. Includono **esoscheletri e dispositivi di protezione bio-ispirati** per ridurre lo sforzo biomeccanico e aumentare la stabilità dell'operatore, e indumenti intelligenti dotati di sensori ottici o conduttivi. Questi dispositivi monitorano in tempo reale i parametri vitali, lo stress posturale e il carico mentale (*mental strain*), interfacciandosi direttamente con i domini dell'ergonomia fisica e cognitiva dell'impianto.

6. **Robot Intelligenti o Adattivi:** Rappresentano il passo successivo rispetto ai cobot di prima generazione (sicuri ma limitati in velocità e capacità di carico). I robot adattivi sono in grado di **riconfigurarsi autonomamente in ambienti complessi e situazioni inedite**, eseguendo compiti avanzati come l'assemblaggio di componenti di precisione o la manipolazione di materiali flessibili, combinando l'efficienza delle macchine convenzionali con la flessibilità cognitiva.
7. **Sistemi Intelligenti di Gestione dell'Energia (Intelligent Energy Management Systems - IEMS):** Soluzione ingegneristica volta a mitigare l'**effetto rimbalzo (*rebound effect*)**, ovvero l'incremento della domanda globale di energia causato dalla digitalizzazione pervasiva. Gli IEMS monitorano e controllano i vettori energetici in tempo reale. Integrati con sistemi di *demand response*, stoccaggio intelligente (*smart storage*) e blockchain per lo scambio di elettricità peer-to-peer, facilitano l'integrazione efficiente delle fonti rinnovabili nei processi industriali.
8. **Simulazione Dinamica e Gemello Digitale (Dynamic Simulation and Digital Twin - DSDT):** Sistemi *data-driven* che accoppiano il mondo fisico a quello virtuale integrando dati storici e in tempo reale. Oltre a ottimizzare i flussi nei contesti di personalizzazione di massa (*mass personalization*), il DSDT è essenziale per la sostenibilità: permette di **simulare e prevedere l'impronta socio-ambientale (*socio-environmental footprint*)** di prodotti e processi lungo l'intero ciclo di vita, dal design fino al recupero *end-of-life*.
9. **Gestione Intelligente del Ciclo di Vita del Prodotto (Smart Product Lifecycle Management - SPLM):** Sistemi che creano modelli digitali integrati dei processi di prodotto, servizio e catena di approvvigionamento. L'SPLM governa i dati dei "prodotti intelligenti"

(dotati di sensori e software embedded) connettendoli ai servizi cloud e aziendali. Questo controllo centralizzato supporta direttamente gli obiettivi di produttività, servitizzazione e soprattutto **circularità del prodotto (economia circolare)**, ottimizzando le strategie di dismissione e recupero a fine vita.

## 2.4 Lean 5.0

### 2.4.1 Introduzione alla Lean 5.0

Oggi le aziende manifatturiere si trovano a rispondere a requisiti dei clienti sempre più stringenti e a un contesto competitivo fortemente intensificato. In questo scenario, l'adozione di principi e strumenti *Lean* per l'eliminazione degli sprechi (*muda*) rappresenta ormai una pratica ben consolidata. La visione convenzionale mostra tuttavia come la maggior parte delle aziende percepisca la necessità di implementare tali strumenti solo a valle, ovvero quando si trova ad affrontare problematiche concrete come difetti e inefficienze all'interno del processo di produzione effettivo.

Attendere che tali criticità si manifestino configura un approccio puramente reattivo o curativo, il quale genera costi significativi e gravi danni operativi. Al contrario, una strategia decisamente più efficiente consiste nell'integrare i principi snelli fin dalla fase di progettazione (*design phase*) del sistema di produzione, consentendo di prevedere ed evitare i problemi prima che si verifichino concretamente. Per assumere decisioni efficaci fin dall'inizio e garantire che il sistema operi al livello di prestazioni target, è necessario un cambio di prospettiva che conduca da una logica reattiva a un approccio proattivo e preventivo. Questa integrazione precoce previene l'insorgenza di

difetti e sprechi durante la fase di utilizzo e sfruttamento dell'impianto, riduce il rischio di cali prestazionali e massimizza l'efficacia dell'intero ciclo produttivo fin dalla definizione delle specifiche tecniche, allineando nativamente il sistema ai più moderni requisiti industriali.

## 2.4.2 Cos'è la Lean 5.0

Contemporaneamente al processo di assimilazione dei paradigmi dell'Industria 4.0 — focalizzato sulle forti sinergie tra *Lean Production* e tecnologie digitali (*Lean 4.0*) — ha iniziato a delinearsi la Quinta Rivoluzione Industriale. L'Industria 4.0 si è dimostrata parzialmente insufficiente nel promuovere la sostenibilità e nel garantire il benessere dei lavoratori: focalizzandosi quasi esclusivamente sulla digitalizzazione (*Cloud, IoT, Big Data, AI*) per massimizzare l'automazione e l'efficienza dei flussi, ha configurato un approccio prettamente tecnocentrico. In tale contesto, l'operatore umano è stato spesso identificato come l'anello debole della catena o relegato a un ruolo marginale, inserito in un processo produttivo in cui la macchina si trovava, in misura maggiore o minore, in una condizione di competizione con il lavoratore.

L'Industria 5.0 ridefinisce radicalmente questi confini, evolvendo la trasformazione digitale attraverso tre pilastri imprescindibili stabiliti dalla Commissione Europea: **umanocentrismo, sostenibilità e resilienza**. All'intersezione di questi vettori si colloca il paradigma emergente della **Lean 5.0** [15].

Dal punto di vista scientifico, la Lean 5.0 rappresenta molto più di una semplice estensione della Lean 4.0 e non si configura come una sua mera sostituzione. Si tratta di un salto concettuale che riconduce la filosofia del *Kaizen*

(miglioramento continuo) alle sue radici originarie di rispetto per le persone (*Respect for People*), potenziandola attraverso l'integrazione di sistemi intelligenti e predittivi. La caratteristica distintiva della Lean 5.0 risiede nella ridefinizione e nell'ampliamento dello stesso concetto di spreco (*muda*). Nella visione manifatturiera tradizionale, lo spreco veniva associato esclusivamente a inefficienze materiali o temporali (sovrapproduzione, tempi di attesa, scorte, difetti). Nella Lean 5.0, vengono invece codificati come *muda* strutturali:

- Lo stress psicofisico e il sovraccarico cognitivo (*mental strain*) dell'operatore;
- Il consumo energetico non ottimizzato e l'impronta di carbonio del processo;
- L'incapacità intrinseca di un layout o di una supply chain di assorbire shock e perturbazioni esterne senza collassare (*mancanza di resilienza*).

Per superare queste criticità, la Lean 5.0 si struttura come un ecosistema di apprendimento predittivo e bidirezionale, basato sulla teoria dei *Sistemi Cyber-Fisici-Sociali* (CPSS). Mentre la Lean 4.0 sfruttava i dati storici e in tempo reale principalmente per correggere le anomalie *ex-post*, la Lean 5.0 evolve verso un controllo predittivo e proattivo. In questo framework, la tecnologia non sostituisce l'essere umano, ma ne aumenta le capacità fisiche e decisionali (*cognitive and physical augmentation*).

Questa sinergia strutturale si articola attraverso la convergenza di cinque sotto-paradigmi teorici fondamentali:

1. **Lean Umano-Centrico & Lean Automation:** Un modello che ricolloca l'intuizione e la creatività umana al centro dell'automazione. La tecnologia viene ottimizzata in funzione delle esigenze ergonomiche e cognitive del lavoratore (configurando il profilo dell'operatore in ottica

*Operator 5.0*), garantendo che la cooperazione uomo-macchina (*Human-Robot Collaboration*) incrementi la flessibilità del sistema senza dequalificare le competenze dell'operaio.

2. **Lean Sostenibile & Lean Verde:** Integrazione metodologica volta a minimizzare l'impatto ambientale della fabbrica. Utilizza strumenti come il *Green Value Stream Mapping* e il *Lean Life Cycle Assessment* (LCA) per tracciare e ridurre non solo gli sprechi temporali, ma anche i flussi energetici, l'uso di materie prime vergini e le emissioni atmosferiche, mitigando i possibili effetti di rimbalzo ecologico legati alla digitalizzazione.
3. **Lean Remanufacturing & Disassembly:** Estensione dei principi snelli alle strategie di fine vita del prodotto (*End-of-Life*). Il focus si concentra sulla progettazione di flussi logistici inversi e su processi di disassemblaggio snelli, finalizzati a rigenerare, riparare e reinserire i componenti all'interno dei cicli dell'economia circolare con tempi di ciclo ridotti.
4. **Lean Sicurezza:** Un approccio che assimila la sicurezza e la salute sul luogo di lavoro come requisiti primari e integranti della qualità totale. L'eliminazione dei rischi infortunistici e posturali (mappati tramite indici biometrici in tempo reale) viene trattata con la stessa severità riservata all'eliminazione di un difetto di produzione, applicando logiche *Poka-Yoke* direttamente all'ergonomia della postazione di lavoro.
5. **Lean Resilienza:** Focus sulla progettazione di architetture industriali flessibili e adattive. Superando la rigidità intrinseca del *Just-In-Time* esasperato, questo modello introduce ridondanze strategiche controllate, modularità delle interfacce e diversificazione logistica per garantire che

il sistema mantenga la stabilità operativa di fronte a interruzioni della supply chain o a repentini cambi di mix richiesti dal mercato (*mass personalization*).

In sintesi, la Lean 5.0 si propone come un framework normativo e metodologico capace di connettere l'intelligenza flessibile umana con l'efficienza computazionale delle tecnologie digitali, trasformando l'efficienza operativa in un motore di benessere sociale e responsabilità ambientale [14] [15].

### 2.4.3 Vincoli e Parametri Operativi nei Domini DfX

Per tradurre queste linee guida in soluzioni ingegneristiche concrete, le aziende adottano l'approccio del *Design for X* (DfX) come metodologia concorrente per ottimizzare il ciclo di vita del sistema fin dalle prime fasi. Sebbene i metodi DfX tradizionali tendano a concentrarsi su un singolo criterio isolato, il paradigma della Lean 5.0 richiede che ogni requisito operativo sia strettamente collegato a un **parametro di controllo quantitativo**, definendo i relativi **vincoli operativi** (*Lean constraints*). Questi vincoli stabiliscono i confini matematici e fisici entro cui il sistema deve operare, influenzando direttamente il dimensionamento della capacità produttiva, la scelta dell'hardware e la pianificazione del layout.

Basandosi sulla letteratura scientifica e sull'analisi delle metodologie DfX più diffuse, i requisiti Lean, i parametri quantitativi di ottimizzazione e i vincoli tecnologici vengono mappati all'interno di sei macro-domini d'azione:

#### 1. Progettazione per la Produzione e il Costo (Ambito Produzione Snella e Assemblaggio)

Questo dominio unisce gli approcci di *Design for Production* (DfP), *Design for Cost* (DfC), *Design for Manufacture* (DfM) e *Design for Assembly* (DfMA) con l'obiettivo di minimizzare il *throughput time*, semplificare l'architettura del prodotto e ottimizzare i costi del ciclo di vita (LCC).

- **Requisiti di Flusso e Layout:** Si persegue la riduzione dei lotti (*Parametro: Dimensione media del lotto*), l'uniformità dei carichi di lavoro (*Parametro: Tempo di inattività dell'operatore*), l'implementazione della fabbrica visiva (*Parametro: Numero di ausili visivi*) e la configurazione di layout cellulari a "U" (*Parametri: Tempo di ciclo della cella e tempo di movimentazione dell'operatore*). Il flusso deve essere continuo (*Parametro: Tempo di attesa*) e privo di colli di bottiglia (*Parametri: Quantità di stoccaggio temporaneo e indice di visibilità del WIP*). I mezzi di produzione devono garantire flessibilità spaziale (*Parametri: Tempo di riconfigurazione e indice di scalabilità*).
- **Requisiti di Processo e Assemblaggio:** Si punta alla semplificazione delle attività (*Parametro: Numero di attività di processo*) e all'eliminazione delle operazioni a non valore aggiunto (*Parametro: Percentuale di tempo non a valore aggiunto - %NVA*), garantendo il bilanciamento della produzione (*Parametro: Carico di lavoro giornaliero per operatore*). In fase di montaggio, la complessità viene ridotta minimizzando i componenti (*Parametro: Numero totale di componenti per prodotto*), massimizzando l'uso di parti e processi standardizzati (*Parametri: Percentuale di componenti e processi standard*) ed eliminando geometrie complesse o lavorazioni secondarie (*Parametri: Indice di complessità geometrica e numero di processi secondari*).

## **2. Progettazione per la Qualità e il Controllo del Processo (Ambito Lean Six Sigma)**

Questo dominio, che combina le logiche di *Design for Variation* (DfV) e *Design for Six Sigma* (DfSS), mira a sviluppare processi robusti rispetto alle fonti di variabilità ingegneristica e ambientale, allineando la produzione alle metriche *Critical to Quality* (CTQ) del cliente.

- **Requisiti Qualitativi:** Il sistema deve garantire la capacità produttiva richiesta (*Parametro: Capacità totale di produzione*), assicurare la conformità fin dal primo tentativo eliminando i costi di rilavorazione (*Parametro: Rendimento al primo colpo - First Time Yield*) e integrare sistemi di rilevamento immediato delle anomalie direttamente nel punto di implementazione (*Parametro: Velocità di rilevamento errori Poka-Yoke*).

### **3. Progettazione per la Manutenzione e la Manutenibilità (Ambito Manutenzione Snella)**

Questo modulo integra le metodologie di *Design for Reliability* (DfR), *Design for Maintainability* (DfMy) e *Design for Supportability* (DfSu) per definire l'equilibrio ottimale tra costi di investimento e costi operativi di manutenzione, assicurando la massima disponibilità dell'impianto.

- **Requisiti Manutentivi:** Richiede la corretta mappatura preventiva dei modi di guasto (*Parametro: Indice del Numero di Priorità del Rischio - RPN tramite FMEA*), il potenziamento della manutenzione autonoma affidata agli operatori (*Parametro: Frequenza delle attività di manutenzione autonoma*) e la disponibilità immediata delle risorse (*Parametri: Tasso di disponibilità degli strumenti e precisione dell'inventario dei pezzi di ricambio*). L'affidabilità e la reattività del sistema vengono monitorate matematicamente attraverso il tempo medio tra i guasti (*Parametro: MTBF*), il tempo medio di riparazione

(*Parametro: MTTR*) e l'accuratezza dei sistemi di diagnostica predittiva (*Parametro: Accuratezza del rilevamento dei guasti*).

#### **4. Progettazione per la Sostenibilità e il Fine Vita (Ambito Lean Green & LCA)**

Questo dominio applica il *Life Cycle Thinking* attraverso le metodologie di *Design for Environment* (DfE) e *Design for Remanufacturing/Disassembly* (DfAD), integrando le considerazioni ecologiche fin dalle prime fasi per evitare l'effetto rimbalzo energetico del sistema sia in fase di produzione che di manutenzione.

- **Requisiti di Sostenibilità e Circolarità:** Si monitora l'efficienza dei flussi (*Parametri: Indice di visualizzazione VSM e rapporto del valore aggiunto*), minimizzando l'intensità energetica (*Parametro: Tasso di consumo di risorse ed energia*) e le emissioni gassose (*Parametro: Tasso di emissione di CO<sub>2</sub>*). L'economia circolare viene implementata progettando il recupero a fine vita (*Parametri: Tasso di recupero EoL e tasso di conversione dei rifiuti in materie prime secondarie*), ottimizzando i processi di rigenerazione (*Parametro: Efficienza del remanufacturing*) e riducendo la complessità di smontaggio dei componenti (*Parametri: Tempo di disassemblaggio e rapporto dei componenti separati*).

#### **5. Progettazione per l'Uomo e la Sicurezza (Ambito Lean Umanocentrico)**

Focalizzato sulla sicurezza e sull'ergonomia fisica e cognitiva, questo dominio progetta l'ambiente di lavoro per supportare l'operatore, prevenendo il sovraccarico mentale e lo stress biomeccanico.

- **Requisiti Antropocentrici:** Il sistema deve monitorare e garantire la sicurezza fisica e la salute sul lavoro (*Parametri: Indice di sicurezza e*

*indice di benessere*), riducendo al minimo il rischio ergonomico sulle postazioni (*Parametro: Indice di rischio NIOSH/OWAS/RULA*). La crescita delle competenze viene mappata continuamente (*Parametro: Indice di problem-solving e competenze*). L'automazione deve supportare l'uomo e non sostituirlo, promuovendo la collaborazione (*Parametri: Tasso di interazione e uso di Cobot, e Indice di Collaborazione Uomo-Macchina - HRC*) e garantendo la massima trasparenza informativa sull'impianto (*Parametri: Disponibilità delle informazioni in tempo reale e indice di connettività*).

## **6. Progettazione per la Resilienza e l'Adattabilità (Ambito della Resilienza Snella)**

Questo dominio definisce la capacità del sistema di mantenere la stabilità operativa, riconfigurarsi e assorbire shock simmetrici o asimmetrici dovuti a fluttuazioni di mercato o interruzioni logistiche.

- **Requisiti di Resilienza e Flessibilità:** Si gestiscono le ridondanze strategiche controllate (*Parametri: Utilizzo delle funzioni ridondanti e rapporto di inventario per la mitigazione del rischio*), l'indipendenza modulare delle interfacce di prodotto (*Parametro: Tasso di indipendenza delle interfacce*) e la riconfigurabilità rapida della supply chain (*Parametri: Indice di riconfigurabilità e numero di alternative logistiche*). La flessibilità dell'impianto si riflette sulla semplicità d'uso delle tecnologie (*Parametro: Indice di usabilità tecnologica*) e sulla mobilità fisica delle attrezzature nello spazio (*Parametri: Indice di convertibilità e mobilità dei mezzi di produzione senza fissaggi permanenti a terra*).

La stragrande maggioranza di questi requisiti trova una risposta operativa nell'applicazione coordinata degli **otto strumenti chiave della produzione snella** (SMED, 5S, Kanban, TPM, Poka-Yoke, JIT, Heijunka e VSM). Nella Lean 5.0, tuttavia, l'efficacia di questi strumenti viene potenziata dall'integrazione nativa delle tecnologie abilitanti: i robot collaborativi (*cobot*) e gli esoscheletri sollevano l'uomo dalle mansioni fisicamente logoranti, riducendo gli indici di rischio ergonomico; l'IoT e l'Intelligenza Artificiale guidano la qualità e la manutenzione predittiva, minimizzando l'MTTR; i sistemi intelligenti di gestione dell'energia (IEMS) ottimizzano le linee di fornitura energetica; e il modello dei Gemelli Digitali (*Digital Twins*), basato sulla replica fedele del sistema reale, viene utilizzato per simulare virtualmente l'impatto delle varianti di processo, dei vincoli operativi e delle perturbazioni della supply chain prima ancora che qualunque modifica venga fisicamente implementata.

## **Capitolo 3 Analisi dello stato dell'arte nelle aziende italiane tramite interviste**

Il tessuto industriale nazionale, in linea con i trend globali, sta affrontando la transizione verso il paradigma dell'Industry 5.0. Tuttavia, l'effettivo livello di implementazione varia sensibilmente da realtà a realtà. Il presente capitolo si propone di descrivere i criteri metodologici alla base della ricerca e di valutare, in ottica macroscopica e aggregata, il grado di maturità tecnologica riscontrato e lo stato di avanzamento verso i pilastri della Quinta Rivoluzione Industriale.

### 3.1 Metodologia di ricerca e strutturazione del campione aziendale

La metodologia di indagine è stata strutturata al fine di ottenere una mappatura quanto più eterogenea e rappresentativa delle diverse dinamiche produttive. A tal fine, la selezione dei casi studio è stata guidata dai seguenti driver strategici:

- **Dimensione aziendale:** sono state coinvolte realtà con classi dimensionali diversificate (Piccole, Medie e Grandi Imprese) per analizzare come la disponibilità di risorse e la complessità organizzativa influenzino la reattività allo sviluppo tecnologico.
- **Settore merceologico:** l'attenzione è stata focalizzata su organizzazioni operanti nel settore manifatturiero e nella produzione di beni, contesti in cui l'applicazione pratica dei paradigmi Lean, Industry 4.0 e Industry 5.0 risulta maggiormente misurabile e impattante.
- **Modello di business e orientamento al mercato (B2B vs B2C):** si è scelto di diversificare il campione considerando sia aziende che operano nel mercato Business-to-Business (B2B) sia realtà orientate al Business-to-Consumer (B2C). Questo driver permette di osservare se la spinta verso la sostenibilità e la centralità dell'uomo sia guidata principalmente dalle richieste dirette dei consumatori finali o dai requisiti di conformità imposti dalle filiere di fornitura industriali.
- **Grado di consapevolezza del paradigma:** si è scelto deliberatamente di includere sia organizzazioni che già conoscono e teorizzano i principi dell'Industry 5.0, sia realtà che non hanno ancora familiarità con questa specifica definizione. L'obiettivo è analizzare come queste ultime, pur

non conoscendo nominalmente il paradigma, ne implementino o ne anticipino comunque le logiche all'interno dei propri processi operativi.

### 3.1.1 Strutturazione delle interviste e aree di indagine

Per valutare il posizionamento empirico delle realtà coinvolte, lo strumento di indagine è stato configurato secondo un modello di intervista semi-strutturata. Le domande formulate miravano, in prima istanza, a rilevare il livello di conoscenza teorica dei paradigmi della *Lean Production*, dell'Industry 4.0 e dell'Industry 5.0, per poi approfondire l'effettivo grado di penetrazione e applicazione di tali metodologie all'interno del sistema operativo aziendale.

Il protocollo di intervista è stato articolato in tre macro-aree tematiche interconnesse, ciascuna focalizzata su specifici obiettivi di indagine:

- **Contesto operativo e gestione dei processi (Area Azienda):** questa sezione iniziale è stata concepita per inquadrare la dimensione e il settore merceologico di riferimento. Successivamente, l'indagine si è focalizzata sulle pratiche operative legate alla *Total Productive Maintenance* (TPM), valutando il livello di manutenzione autonoma affidata agli operatori, l'ottimizzazione del layout per la riduzione dei movimenti e la pianificazione delle attività per l'abbattimento dei tempi morti. In quest'area sono stati inoltre esplorati i temi legati ai programmi di *training* per lo sviluppo delle competenze, alla sicurezza sul lavoro e alla resilienza operativa (intesa come capacità di recupero rapido a seguito di imprevisti o shock estremi).
- **Maturità digitale e tecnologie abilitanti (Area Digitale):** l'obiettivo di questo blocco di domande è stato verificare il grado di consapevolezza

nominale rispetto al paradigma dell'Industry 5.0 (nei suoi tre pilastri di umanocentrismo, sostenibilità e resilienza). Parallelamente, è stato indagato l'orientamento strategico verso l'Intelligenza Artificiale e l'adozione di soluzioni digitali avanzate per il supporto alle attività produttive e manutentive, quali i sistemi CMMS (*Computerized Maintenance Management System*) e i modelli di *Digital Twin*, identificando quali tecnologie abbiano generato il maggiore impatto sulle performance.

- **Sostenibilità e gestione degli sprechi (Area Sostenibilità):** l'ultima macro-area si è proposta di analizzare le strategie aziendali dedicate alla mitigazione dei classici sprechi *Lean* (sovrapproduzione, scarti, movimentazioni superflue, inventario e attese). Nello specifico, l'intervista ha voluto investigare il driver primario di tali azioni, distinguendo tra finalità puramente economico-finanziarie e orientamento alla sostenibilità ambientale. Infine, sono stati approfonditi i sistemi di misurazione dell'impatto ecologico, l'integrazione di criteri green nelle decisioni di investimento e la vision a lungo termine circa la stabilità e la replicabilità futura del modello adottato.

Domande utilizzate per le interviste e spiegazione della scelta

## **SEZIONE 1: ANAGRAFICA E GESTIONE OPERATIVA (LEAN PRODUCTION)**

Questo primo blocco di domande mira a definire il profilo strutturale dell'azienda e a misurare il livello di maturità e penetrazione delle pratiche di *Lean Manufacturing* e gestione snella della produzione.

- **Domande 1 - 2 (Inquadramento e Contesto):**
  - *D1: Salve, siamo qui con ... ?*

- *D2: Qual è la dimensione della vostra azienda? In che settore operate?*
- **Scopo metodologico:** Identificare l'intervistato e mappare l'organizzazione all'interno delle categorie dimensionali standard (Micro, Piccola, Media, Grande Impresa) e dei rispettivi settori merceologici. Questa classificazione è propedeutica a comprendere la pertinenza e l'accessibilità ex-ante delle specifiche tecnologie abilitanti dell'Industry 4.0 e 5.0.
- **Domanda 3 (Maturità manutentiva - TPM):**
  - *D3: Sa cos'è la TPM? (Se sì) Che voto si darebbe da 1 a 10?*
  - **Scopo metodologico:** Rilevare il posizionamento dell'azienda lungo il continuum che separa la manutenzione puramente reattiva (a guasto) da quella proattiva (preventiva e predittiva). Il punteggio autovalutato evidenzia la consapevolezza del management rispetto ai tre pilastri del *Total Productive Maintenance*: zero difetti, zero guasti, zero infortuni.
- **Domande 4 - 5 (Ottimizzazione dei flussi e Layout):**
  - *D4: Cosa fa la sua azienda per ottimizzare lo spazio di lavoro?*
  - *D5: Le attività sono programmate per evitare tempi morti tra macchine e settori?*
  - **Scopo metodologico:** Analizzare le strategie di *Spaghetti Chart*, *5S* o *Value Stream Mapping* applicate all'ottimizzazione del layout di fabbrica. L'obiettivo è misurare l'efficienza del sistema nel minimizzare i tempi morti di attraversamento e i colli di bottiglia tra reparti attigui.
- **Domande 6 - 7 (Coinvolgimento operativo e Vincoli della manutenzione):**
  - *D6: Gli operatori eseguono piccoli interventi di manutenzione sul proprio posto di lavoro?*
  - *D7: Quali ostacoli incontrate più spesso nella manutenzione quotidiana?*
  - **Scopo metodologico:** Indagare il livello di adozione della "manutenzione autonoma" (assegnata direttamente alla forza

lavoro in linea) e far emergere i colli di bottiglia quotidiani incontrati dalle diverse imprese (es. usura dei macchinari, pulizia dei residui, obsolescenza tecnologica).

- **Domande 8 - 11 (Capitale Umano, Formazione e Sicurezza):**

- *D8: Che tipo di training per lo sviluppo delle competenze viene usato per formare i dipendenti?*
- *D9: I principi applicati nella produzione sono sicuri per i dipendenti e replicabili con nuovi dipendenti?*
- *D10: Cosa fate per garantire pochi infortuni sul lavoro e malattie contratte sul posto?*
- *D11: Questi accorgimenti vengono considerati sia da operai che dirigenti?*
- **Scopo metodologico:** Esplorare le politiche di *knowledge management* e l'istituzionalizzazione della sicurezza sul lavoro. Le domande valutano la standardizzazione dei processi (replicabilità del training) e verificano l'esistenza di una cultura partecipativa della sicurezza, condivisa capillarmente sia dal livello operaio che da quello dirigenziale.

- **Domanda 12 (Resilienza organizzativa):**

- *D12: In caso di imprevisti il recupero è rapido o si affrontano gravi difficoltà, le conseguenze sono le stesse anche in caso di shock estremo?*
- **Scopo metodologico:** Testare la capacità di assorbimento e la velocità di ripristino delle imprese di fronte a turbative interne (es. guasti) o macro-shock esogeni sistemici (es. crisi di mercato, interruzioni della supply chain), ponendo le basi per l'analisi della resilienza, pilastro cardine dell'Industry 5.0.

## SEZIONE 2: TRANSIZIONE DIGITALE (DIGITALE)

La seconda sezione si sposta sulle tecnologie digitali e computazionali, indagando l'approccio aziendale verso i paradigmi tecnologici correnti ed emergenti.

- **Domande 13 - 14 (Conoscenza dell'Industry 5.0 e Visione dell'IA):**

- *D13: Ha mai sentito parlare di Industry 5.0?*
- *D14: Cosa ne pensa dell'utilizzo dell'IA? La utilizzate o avete intenzione di usarla in ambito lavorativo?*
- **Scopo metodologico:** Rilevare il grado di alfabetizzazione e consapevolezza del management circa l'evoluzione dal modello 4.0 al modello 5.0. Al contempo, si intende mappare l'orientamento strategico, le opportunità percepite e i timori etico-operativi legati all'introduzione dell'Intelligenza Artificiale nei processi di lavoro.
- **Domande 15 - 16 (Strumenti abilitanti 4.0/5.0 ed Impatto sulle performance):**
  - *D15: Vengono utilizzati altri strumenti digitali, come ad esempio CMMS o Digital Twin per l'ausilio dell'attività?*
  - *D16: Quali tecnologie hanno avuto un impatto maggiore sulle prestazioni aziendali?*
  - **Scopo metodologico:** Verificare l'adozione effettiva di tecnologie digitali avanzate per la manutenzione e la simulazione di fabbrica (CMMS, MES, Digital Twin). L'obiettivo finale è circoscrivere quale specifica tecnologia abbia generato il maggiore impatto incrementale sulle performance complessive dell'intera organizzazione o di un suo specifico dipartimento.

### **SEZIONE 3: SOSTENIBILITÀ INTEGRATA (SOSTENIBILITÀ)**

L'ultima sezione dell'intervista chiude il cerchio concettuale esaminando come l'impresa declini i concetti di efficienza ecologica, responsabilità d'impresa e proiezione nel futuro lungo il ciclo di vita del prodotto.

- **Domande 17 - 18 (Caccia ai Muda e Driver decisionali):**
  - *D17: Cosa fa l'azienda per ridurre gli sprechi come ad esempio sovrapproduzione, scarti dovuti a difetti, o quelli derivanti da movimenti, sia umani che dei materiali, da inventario e tempi morti? (sprechi della lean production)*
  - *D18: Ciò viene fatto più per un punto di vista economico o di sostenibilità?*

- **Scopo metodologico:** Mappare le azioni intraprese per l'abbattimento dei tradizionali sprechi produttivi (*Muda* della Lean). La domanda successiva agisce da raccordo teorico fondamentale: serve a discriminare se la caccia allo spreco risponda unicamente a una logica di riduzione dei costi vivi (tipica della Lean classica) o se rifletta una genuina sensibilità verso la sostenibilità ecologica (caratteristica dell'Industry 5.0).
- **Domanda 19 (Metriche di misurazione ecologica):**
  - *D19: Come viene misurato l'impatto ambientale?*
  - **Scopo metodologico:** Rilevare l'esistenza di KPI quantitativi, bilanci di sostenibilità o controlli ispettivi interni/esterni finalizzati a tracciare in modo oggettivo l'impronta ecologica delle attività di stabilimento.
- **Domanda 20 (Criteri di investimento tecnologico):**
  - *D20: Si tiene in considerazione l'impatto ambientale durante l'investimento in nuove tecnologie o migliorie?*
  - **Scopo metodologico:** Valutare se la sostenibilità ambientale sia un vincolo decisionale ex-ante integrato nelle scelte strategiche di acquisto di nuovi asset, o se rimanga un elemento marginale rispetto alle valutazioni sul mero ritorno finanziario dell'investimento (*ROI*).
- **Domanda 21 (Evoluzione dei modelli futuri):**
  - *D21: Pensa che il modello che sta applicando ora rimarrà pressoché lo stesso in futuro sia per l'impatto ambientale, sia per l'utilizzo delle tecnologie e per la formazione dei dipendenti?*
  - **Scopo metodologico:** Offrire una sintesi prospettica. Questa domanda conclusiva interroga l'intervistato sulle traiettorie evolutive future che l'impresa intende percorrere nei tre macro-ambiti investigati, evidenziando la capacità dell'organizzazione di adattarsi continuamente a mercati sempre più digitalizzati, resilienti e focalizzati sulla centralità dell'essere umano (*human-centricity*).

### 3.1.2 Profilo dei campioni analizzati

Tabella I: Profilo dei campioni analizzati

| ID<br>AZIENDA | CLASSE<br>DIMENSIONALE | PARAMETRI<br>DIMENSIONALI | SETTORE<br>MERCEOLOGICO                                 | RUOLO<br>DELL'<br>INTERVISTATO/A |
|---------------|------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------|
| AZIENDA<br>1  | MEDIA<br>IMPRESA       | 250<br>DIPENDENTI         | ATTREZZATURE<br>PROFESSIONALE<br>PER LA<br>RISTORAZIONE | RESPONSABILE<br>DI PRODUZIONE    |
| AZIENDA<br>2  | GRANDE<br>IMPRESA      | 1500<br>DIPENDENTI        | CHIMICO-<br>FARMACEUTICA                                | SPECIALISTA<br>ICT               |
| AZIENDA<br>3  | PICCOLA<br>IMPRESA     | 50<br>DIPENDENTI          | EDILIZIA                                                | RESPONSABILE<br>DI PRODUZIONE    |
| AZIENDA<br>4  | MEDIA<br>IMPRESA       | 260<br>DIPENDENTI         | AEROSPAZIALE                                            | RESPONSABILE<br>DI PRODUZIONE    |
| AZIENDA<br>5  | MICRO<br>IMPRESA       | 8<br>DIPENDENTI           | METALMECCANICO                                          | GESTIONE<br>GENERALE             |

### 3.1.3 Presentazione e discussione dei casi aziendali

#### Azienda 1

È stata condotta un'indagine approfondita con il Responsabile di Produzione che ha permesso di tracciare il quadro di una aziende di medie dimensione operante

nel settore dell'arredamento e delle cucine. L'azienda è caratterizzata da una struttura articolata su più stabilimenti, in cui la sede principale gestisce la linea caldo, mentre il secondo sito produttivo si occupa della linea freddo.

Dal punto di vista operativo, l'organizzazione mostra una maturità parziale nell'adozione delle metodologie di Lean Production. Sebbene la direzione conosca i principi del Total Productive Maintenance (TPM) e manifesti la chiara volontà di implementarli nel medio termine, il management assegna all'attuale situazione aziendale un'autovalutazione intermedia, pari a cinque su di essi. L'ottimizzazione dei flussi e del layout viene invece gestita in modo rigoroso a livello di singoli reparti, combinando strumenti consolidati come la Value Stream Mapping (VSM), il metodo 5S e lo Spaghetti Chart. Questa riconfigurazione delle aree di lavoro segue una precisa logica paretiana basata sul principio ottanta-venti, con l'obiettivo di posizionare i codici a maggiore rotazione il più vicino possibile all'operatore, riducendo drasticamente i tempi morti e gli spostamenti superflui.

La manutenzione quotidiana, tuttavia, non prevede un coinvolgimento attivo degli operai di linea, i quali si limitano alla pulizia ordinaria delle attrezzature; la responsabilità degli interventi ricade interamente su un manutentore interno, coadiuvato da una ditta specializzata per i grandi impianti. In questo contesto emerge un trade-off connaturato alla manutenzione preventiva, la quale spinge spesso a sostituire componenti ancora parzialmente funzionanti al solo fine di azzerare il rischio di un guasto improvviso. Per quanto riguarda lo sviluppo delle risorse umane, la formazione segue un approccio duplice che coniuga corsi teorico-pratici erogati da enti esterni e un portale aziendale interno accessibile sia al personale impiegatizio sia agli operai. La sicurezza sul lavoro è istituzionalizzata attraverso il monitoraggio costante degli indici di gravità e frequenza degli infortuni, mitigati da servizi di prevenzione dedicati e dalla fornitura di idonei dispositivi di protezione individuale (DPI), con un'osservanza rigorosa delle regole condivisa in modo sinergico tra la forza lavoro e la dirigenza. Ciò premesso, la resilienza organizzativa dinanzi a macro-shock della domanda risulta ancora limitata, costringendo l'azienda a ricorrere alla cassa integrazione qualora non riesca a ricalibrare i volumi di produzione in tempi brevi.

La transizione digitale presenta luci e ombre. Il paradigma dell'Industry 5.0 risulta sconosciuto agli intervistati e l'utilizzo dell'intelligenza artificiale si ferma all'adozione sporadica di Microsoft Copilot, sebbene vi sia la volontà manifesta di integrarla a livello gestionale. Non si registrano tecnologie

sofisticate di simulazione avanzata come il Digital Twin, e gli investimenti tecnologici recenti si concentrano sul rinnovamento dei macchinari d'officina e degli impianti di produzione. Anche l'approccio alla sostenibilità rimane legato a logiche tradizionali: la riduzione dei Muda (sprechi) si focalizza sull'ottimizzazione del packaging e sulla riduzione dello sfrido delle lamiere, ma l'intero processo è guidato da un driver principalmente economico, dato che l'azienda fatica a giustificare investimenti ecologici privi di un ritorno finanziario tangibile. Benché non si disponga di indicatori ambientali specifici per il singolo stabilimento, è noto che il gruppo multinazionale monitora tali metriche a livello globale; ciononostante, la sostenibilità viene considerata nelle scelte tecnologiche fin dalla fase iniziale, nella convinzione che il modello operativo debba necessariamente adattarsi nel tempo.

## **Azienda 2**

È stata effettuata un'intervista con la specialista ICT di una grande realtà multinazionale del settore chimico-farmaceutico, caratterizzata da un organico di millecinquecento dipendenti.

In questo contesto, la gestione operativa legata alla Lean Production raggiunge i massimi livelli di maturità. La consapevolezza del framework TPM è totale, come dimostrano un'autovalutazione pari a otto e l'obiettivo strategico di raggiungere il punteggio massimo entro il 2030, azzerando guasti e infortuni. L'efficienza dei flussi si regge su un impianto logistico all'avanguardia, contraddistinto da magazzini verticali completamente automatizzati, dall'utilizzo di veicoli a guida autonoma (AGV) e dal monitoraggio continuo delle linee di produzione. La resilienza organizzativa è elevata grazie a una struttura intrinsecamente adattabile e alla redazione di Remediation Plan formali, strutturati per affrontare situazioni d'emergenza particolarmente gravi. Il capitale umano rimane al centro di consistenti investimenti, realizzati sia tramite partnership esterne sia attraverso un modello interno di Train-the-Trainer, in cui i dipendenti ricevono una formazione specifica per assumere il ruolo di docenti nei confronti dei propri colleghi. La cultura della sicurezza va oltre i vincoli normativi secondo un'ottica di compliance proattiva, imponendo tutele fornite per il lavoro in quota già a partire dai tre metri, anticipando significativamente la soglia legale fissata a sette metri.

La spinta verso la digitalizzazione è pervasiva in tutta l'organizzazione e prevede un piano di transizione specifico per ciascun dipartimento, finalizzato alla dematerializzazione totale dei processi. Sebbene non si applichi formalmente la definizione di Industry 5.0, l'azienda ne incarna lo spirito

attraverso il pilastro valoriale del People First, recentemente evoluto in Human First. L'intelligenza artificiale rappresenta già una realtà operativa, ma viene gestita con un approccio consapevole e critico volto a preservare la centralità e il controllo dell'utente, al fine di evitare rischi di disengagement cognitivo. Per salvaguardare il patrimonio informativo, la leadership privilegia l'adozione di modelli di intelligenza artificiale aziendali e privati. La tecnologia che ha generato l'impatto più significativo sulle performance complessive è l'E-Procurement, che ha digitalizzato l'intera catena di approvvigionamento. Sul fronte della sostenibilità, la ricerca dei Muda si accompagna a una forte sensibilità etica: l'azienda accetta esplicitamente investimenti con ritorno economico zero o negativo pur di ridurre l'impronta ecologica e generare valore sociale, come dimostrano i progetti legati al carsharing aziendale e all'installazione di colonnine di ricarica per i dipendenti. L'impatto ambientale viene quantificato da un dipartimento interno dedicato e rappresenta un vincolo decisionale fondamentale per l'acquisto di ogni nuova tecnologia, della quale si delinea un modello futuro incentrato sulla responsabilità sociale e sulla tutela del pianeta.

### **Azienda 3**

Il colloquio ha interessato il Responsabile di Produzione di un'azienda di piccole dimensioni, la quale conta circa cinquanta dipendenti e opera nel settore dei materiali da costruzione, specializzandosi nella produzione di guaine per l'impermeabilizzazione.

Dal punto di vista operativo, l'impresa dimostra una conoscenza solida dei principi Lean, posizionandosi su un livello di sufficienza con un voto pari a sei nella gestione complessiva del TPM. Non disponendo di grandi magazzini strutturati, l'azienda ha sviluppato una rigorosa politica di Just-in-Time (JIT), calibrando gli stock sulle richieste reali della clientela principale. Per ottimizzare il layout dello stabilimento e ridurre al minimo i tempi morti tra i reparti, l'organizzazione si affida a un software centralizzato di pianificazione della produzione. A livello di linea, esiste una forma iniziale di manutenzione autonoma: gli operatori eseguono piccoli interventi ordinari direttamente sulle proprie postazioni. La criticità manutentiva principale, tuttavia, non riguarda l'usura meccanica dei macchinari, bensì la necessità costante di pulire le attrezzature dai residui dei materiali lavorati.

La formazione del personale avviene quasi interamente all'interno dell'azienda, attraverso un percorso iniziale di affiancamento sul campo di circa tre mesi, volto ad assicurare la replicabilità e la sicurezza di ciascun processo. Oltre ai

tradizionali corsi sulla sicurezza, l'azienda fornisce tutta l'attrezzatura necessaria e la direzione vigila sul rispetto delle norme, intervenendo con richiami formali immediati in caso di violazione. L'elemento di maggiore fragilità risiede nella resilienza di fronte a shock esterni: in corrispondenza di cali improvvisi della domanda di mercato, l'impresa mostra tempi di recupero prolungati.

Sul fronte della trasformazione digitale e dell'Industry 5.0, si registra un atteggiamento cauto. Il management conosce il paradigma e ne ha esaminato le potenzialità, ma non lo applica alla pratica corrente. L'intelligenza artificiale è relegata a un supporto basilare e frammentario, sebbene il piano a lungo termine ne preveda l'integrazione nei sistemi gestionali. L'architettura tecnologica dello stabilimento poggia su pochi strumenti essenziali, tra i quali spicca il sistema MES, identificato come il fattore determinante per l'ottimizzazione delle performance operative. Per quanto concerne la sostenibilità e la ricerca dei Muda, l'azienda ha concentrato i propri sforzi sul recupero e il riutilizzo dei solventi industriali; tale scelta è dettata principalmente da ragioni economiche di contenimento dei costi di acquisto, piuttosto che da una vocazione ecologica autonoma. La misurazione dell'impatto ambientale risponde agli obblighi normativi, con controlli ispettivi semestrali previsti dalla legge. L'aspetto ecologico viene considerato nella valutazione dei nuovi investimenti tecnologici, ma rimane subordinato ai calcoli di convenienza economico-finanziaria. Le prospettive future dell'azienda si orientano verso un miglioramento generale focalizzato sulla valorizzazione delle persone e delle relative competenze.

#### **Azienda 4**

Si è proceduto a intervistare il Responsabile di Produzione di un'azienda aerospaziale di medie-grandi dimensioni che impiega circa duecentosessanta dipendenti.

L'analisi della gestione operativa quotidiana evidenzia un quadro peculiare: l'azienda stessa valuta la propria maturità TPM con un punteggio pari a due. Tale valore si spiega metodologicamente con la natura del processo produttivo, fortemente incentrato sul lavoro manuale e sul montaggio umano ai banchi di lavoro, dinamica che riduce la rilevanza dei macchinari sulle performance globali. L'organizzazione sta attraversando una fase di profonda ristrutturazione del layout produttivo a causa della rapida crescita registrata, transitando da un modello di stampo artigianale verso flussi di lavoro specializzati e organizzati per isole o sottoinsiemi. La programmazione delle attività è serrata e riduce al minimo i tempi morti, anche in ragione del numero limitato di macchine a

disposizione. Gli operatori non svolgono compiti manutentivi: l'officina dispone di un team interno per la gestione dei guasti ordinari, ma si affida a specialisti esterni per le problematiche complesse. Questo assetto configura un rischio di fermo linea prolungato qualora si verifichi un guasto critico.

La formazione del personale è interamente interna e rigorosa; i neoassunti iniziano l'addestramento su pezzi destinati allo scarto per evitare il danneggiamento di prodotti conformi, e ricevono l'affidamento dei veri sottoinsiemi solo dopo il superamento di test manuali e teorici restrittivi. L'ergonomia e la sicurezza sono presidiate tramite controlli periodici e meeting mensili che coinvolgono attivamente sia gli operai sia i dirigenti. Le oscillazioni della domanda vengono gestite attraverso il ricorso agli straordinari, ma di fronte a uno shock sistemico di mercato il processo di recupero risulterebbe complesso.

Sul fronte tecnologico, il livello di digitalizzazione è avanzato e si inserisce pienamente nella visione dell'Industry 4.0, pur conoscendo i presupposti della 5.0. L'intelligenza artificiale viene utilizzata diffusamente nella fase di Ricerca e Sviluppo per il design e lo sviluppo del prodotto, mentre in produzione si sta procedendo verso un'automazione crescente, con la previsione di integrare l'IA in linea nel breve termine. La tecnologia a maggiore impatto è rappresentata dalle piattaforme di testing digitalizzato, che simulano l'intero ciclo di vita del prodotto, raccolgono dati in tempo reale e inviano alert automatici agli operatori in caso di anomalie, affiancate dall'automazione nella produzione di bobine in fibra ottica. La ricerca dei Muda esclude la sovrapproduzione, dato che l'azienda lavora esclusivamente su commessa, e si concentra sulla riduzione dei difetti qualitativi. La logica sottostante è prettamente economica e legata alla saturazione della capacità produttiva: un pezzo non conforme richiede il medesimo tempo di lavorazione di uno conforme senza generare valore. L'impatto ambientale diretto è contenuto e non viene misurato tramite metriche specifiche, ma la sostenibilità ecologica costituisce un criterio di valutazione fondamentale ed ex-ante per l'acquisto di nuovi macchinari, delineando una traiettoria futura fortemente orientata verso l'automazione e la digitalizzazione.

## **Azienda 5**

L'analisi si conclude con una micro-impresa artigiana che conta otto dipendenti e opera nel settore delle lavorazioni metalmeccaniche conto terzi, dove l'intervista ha coinvolto direttamente il titolare responsabile della gestione.

Il profilo operativo risente della dimensione ristretta: il framework TPM non trova applicazione e la manutenzione risponde a logiche meno strutturate. Lo spazio produttivo è organizzato secondo un layout semplice, con postazioni fisse per ogni operaio e macchinari posizionati in modo adiacente. Tale configurazione presenta il vantaggio di evitare la formazione di code o tempi morti dovuti alla condivisione delle risorse, poiché ogni macchina è presidiata da un unico operatore dedicato. Si registra l'emergere spontaneo di una forma di manutenzione autonoma, in quanto gli operai si fanno carico della pulizia e della cura ordinaria degli strumenti che utilizzano quotidianamente, come saldatrici o aspiratori. Il collo di bottiglia manutentivo più critico è rappresentato dall'obsolescenza tecnologica: l'utilizzo di attrezzature datate rende estremamente difficile il reperimento dei pezzi di ricambio sul mercato, generando lunghe attese in caso di guasto.

La formazione dei dipendenti avviene interamente in azienda secondo il metodo tradizionale dell'affiancamento sul campo. Sebbene i dispositivi di protezione individuale vengano regolarmente distribuiti, la cultura della sicurezza segue una logica verticale, in cui la responsabilità del controllo ricade principalmente sulla dirigenza. La capacità di resilienza organizzativa risulta limitata: il guasto di un asset critico o uno shock di mercato comportano tempi di ripresa lunghi.

Per quanto riguarda la trasformazione digitale, emergono ostacoli economici rilevanti che frenano l'innovazione. Il management non prevede l'applicazione dell'intelligenza artificiale se non per compiti amministrativi elementari, e non investe nelle tecnologie abilitanti di Industry 4.0 e 5.0 a causa della barriera del ROI, ritenuto insostenibile per i volumi aziendali. L'unico strumento informatico introdotto è un software in cloud per la fatturazione elettronica, focalizzato sulla semplificazione burocratica e amministrativa e non sui processi di officina. Anche la sostenibilità segue una logica pragmatica di contenimento dei costi: la riduzione degli sprechi e dei Muda viene affrontata con una lente rigidamente economica, orientata al controllo dei costi delle materie prime. Non esistono sistemi di misurazione dell'impatto ecologico interni e la valutazione ambientale viene delegata a consulenti esterni per adempiere agli obblighi di legge, concentrandosi quasi esclusivamente sull'inquinamento acustico. Nonostante i forti limiti di budget, il titolare valuta l'impatto ambientale in fase di acquisto di nuovi macchinari, e orienta le aspettative future verso un miglioramento della formazione e l'accesso a contributi e incentivi statali per sostenere lo sviluppo dell'attività.

## **3.2 Analisi empirica e maturità dell'Industry 4.0**

Questo paragrafo analizza il grado di maturità digitale e l'adozione delle tecnologie abilitanti della Quarta Rivoluzione Industriale all'interno del campione. Dalle risposte raccolte è emerso che il paradigma dell'Industry 4.0 risulta ampiamente conosciuto a livello teorico, in modo del tutto indipendente dalle dimensioni dell'azienda. Tuttavia, si è riscontrata una netta differenza nella profondità di tale conoscenza: le realtà che hanno implementato ed adottato sul campo i macchinari e i sistemi interconnessi sviluppati durante questa rivoluzione industriale dimostrano una consapevolezza tecnica e operativa decisamente superiore rispetto a chi ne ha una visione puramente astratta o superficiale.

L'effettiva traduzione di questo paradigma in applicazioni pratiche (come sistemi CMMS o modelli di *Digital Twin*) varia comunque sensibilmente in base alla dimensione aziendale.

### **3.2.1 Applicazione nelle imprese di piccole dimensioni**

Nelle imprese di piccole dimensioni, a fronte di una conoscenza del paradigma che rimane prevalentemente superficiale, si riscontra un sensibile ritardo applicativo rispetto alle organizzazioni di scala maggiore. Questa dinamica è riconducibile, in primo luogo, all'elevata barriera all'entrata costituita dai costi di investimento iniziali e dalle incertezze legate al tempo di ritorno dell'investimento (ROI). Per queste strutture, un'eccessiva esposizione

finanziaria finalizzata alla digitalizzazione radicale dei processi non risulta economicamente sostenibile, poiché rischierebbe di innescare una crisi di liquidità nel breve periodo, compromettendo la continuità aziendale stessa.

Di conseguenza, anziché investire nelle tecnologie core della fabbrica intelligente (come sistemi di produzione automatizzati o infrastrutture IoT complesse), le piccole imprese tendono a focalizzarsi su soluzioni digitali verticali e specifiche, caratterizzate da un ROI immediato e costi di implementazione ridotti. Un esempio virtuoso emerso in questo contesto è l'adozione di piattaforme software gestionali in cloud (quali, ad esempio, *Fatture in Cloud*), concepite per semplificare gli adempimenti amministrativi di Partite IVA e micro-imprese. Tali strumenti, pur nascendo per la digitalizzazione dei flussi di fatturazione e contabilità (gestiti a un livello molto semplice ed economico), vengono sfruttati all'interno delle piccole organizzazioni anche per una gestione iniziale e semplificata del magazzino e dei materiali, rappresentando il primo reale punto di contatto tra l'azienda e la digitalizzazione dei processi operativi.

### **3.2.2 Applicazione nelle imprese di medie dimensioni**

Le imprese di medie dimensioni si collocano in una fascia di transizione, evidenziando una conoscenza più approfondita del paradigma Industry 4.0 e, di conseguenza, un'applicazione più strutturata e strategica rispetto alle micro-realtà. Sebbene la barriera finanziaria legata ai costi di investimento iniziali rimanga un fattore limitante che impedisce una digitalizzazione completa e pervasiva dell'intera infrastruttura, queste organizzazioni operano una selezione pragmatica. L'adozione delle tecnologie abilitanti avviene infatti in modo

mirato, integrando solo le soluzioni ritenute strettamente necessarie e strategiche per lo specifico settore merceologico di appartenenza.

Nello specifico, durante i colloqui, quando è stato richiesto di identificare le tecnologie che hanno generato il maggiore impatto positivo sulle prestazioni aziendali, i manager hanno quasi unanimemente indicato sistemi core dell'Industry 4.0, con particolare riferimento al **MES (Manufacturing Execution System)**. L'introduzione di tali strumenti per il controllo e la gestione in tempo reale della produzione è stata fortemente agevolata dagli incentivi fiscali statali previsti per l'innovazione tecnologica. Questi sostegni economici hanno reso gli investimenti digitali accessibili e finanziariamente sostenibili per imprese di questa scala dimensionale, consentendo loro di migliorare il monitoraggio dei processi e l'utilizzo delle tecnologie digitali a supporto della produzione.

### **3.2.3 Applicazione nelle imprese di grandi dimensioni**

Nelle grandi aziende la conoscenza dell'Industria 4.0 e 5.0 è già ben consolidata, e l'applicazione pratica delle tecnologie abilitanti e dell'automazione avanzata raggiunge i massimi livelli di efficienza. In questo cluster, la digitalizzazione pervasiva di tutti i processi è una realtà operativa ed è chiaramente dichiarata dai manager come uno degli obiettivi strategici fondamentali inseriti nell'Agenda 2030 [9] per lo sviluppo sostenibile.

L'ecosistema tecnologico di queste organizzazioni spazia dalla gestione completamente automatizzata dei flussi di magazzino all'adozione di soluzioni avanzate di **Digital-Procurement**. Questi ultimi strumenti vengono utilizzati per digitalizzare l'intero ciclo degli acquisti aziendali attraverso piattaforme

software dedicate che centralizzano e tracciano ogni singola operazione. I fornitori gestiscono un proprio profilo anagrafico strutturato nei sistemi, eliminando la necessità per l'acquirente di richiedere preventivi tramite i metodi tradizionali o lunghe contrattazioni.

La gara d'appalto (*tender*) è interamente digitale: al momento dell'emissione, il compratore inserisce i dati sulla piattaforma informatica e i fornitori ricevono una notifica automatica; questi ultimi possono accedere al proprio account riservato e inserire i prezzi e le informazioni tecniche nei campi ben definiti del sistema. Alla scadenza della gara, il software raccoglie automaticamente tutte le informazioni inserite ed elabora in tempo reale dei tabelloni comparativi dettagliati. Questa automazione consente al reparto acquisti di visualizzare immediatamente l'opzione economica più vantaggiosa o il fornitore con il punteggio tecnico più elevato, riducendo i tempi di inserimento dati e minimizzando il rischio di errore nella scelta strategica dei partner commerciali.

### **3.3 Percezione e Livello di Transizione verso l'Industry 5.0**

Nel nostro campione aziendale, osserviamo una situazione altamente polarizzata, caratterizzata da un enorme divario culturale e tecnologico basato sulla classe dimensionale delle aziende. La transizione verso l'Industria 5.0 in Italia è ancora in una fase embrionale e presenta molte debolezze strutturali.

Dal punto di vista della maturità concettuale, la conoscenza sui tre pilastri europei (centralità umana, sostenibilità e resilienza) varia fortemente tra i rispondenti. La maggior parte delle volte, questa sensibilità è il risultato della

cultura personale dei manager o degli ingegneri e non di un reale piano aziendale strutturato per la transizione 5.0.

### 3.3.1 Il divario nelle PMI

Nelle piccole e medie industrie, l'applicazione delle direttive dell'Industria 5.0 nella pratica è praticamente inesistente. Manca la tecnologia abilitante che supporti l'operatore o monitori i parametri ecosostenibili. Questo limite è illustrato chiaramente dal modo in cui l'intelligenza artificiale viene sfruttata, essendo attualmente utilizzata per scopi molto superficiali e sporadici.

Le PMI si affidano a strumenti e piattaforme esistenti disponibili sul mercato (soluzioni commerciali generaliste e basate su cloud pubblico), tipicamente impiegate per compiti marginali o amministrativi. Manca totalmente l'integrazione dell'IA nei processi aziendali principali o nei sistemi di produzione (MES/ERP), configurandosi più come uno strumento individuale che come una tecnologia abilitante per i processi.

Per quanto riguarda la sostenibilità, le PMI intervistate mostrano una visione basata esclusivamente su vincoli di bilancio e normativi. Le questioni ambientali ed energetiche sono viste solo da una prospettiva economico-finanziaria e sono essenzialmente inquadrare in due direzioni principali:

- **Gestione del rischio e conformità:** conformità ai limiti legali per evitare sanzioni finanziarie o blocchi operativi;
- **Efficienza operativa:** la riduzione del consumo energetico o delle materie prime, intesa solo come una caccia agli sprechi (*Muda*) per minimizzare il costo delle merci vendute (*COGS*).

La dimensione etica, intesa come responsabilità sociale d'impresa (*CSR*) o salvaguardia proattiva dell'ecosistema indipendentemente dal ritorno economico, gioca un ruolo quasi interamente marginale nelle priorità strategiche delle PMI.

Anche l'analisi della resilienza evidenzia forti criticità operative nelle imprese di minori dimensioni. Di fronte a shock esterni o a problemi legati alla manutenzione degli impianti, le PMI subiscono conseguenze pesanti: i guasti improvvisi e le interruzioni causano gravi ritardi produttivi e richiedono interventi di riparazione imprevisti che incidono pesantemente sul rendimento economico complessivo e sulla stabilità dell'impresa

### **3.3.2 Proattività e casi d'uso nelle grandi imprese**

Uno scenario diametralmente opposto emerge invece dall'analisi delle aziende di grandi dimensioni. In questo cluster, si osserva una chiara predisposizione strategica e strutturale alla transizione 5.0, supportata da un allineamento molto forte e strutturato ai concetti di centralità umana e sostenibilità.

La sostenibilità nelle grandi organizzazioni è svincolata dalla pura logica del profitto a breve termine per abbracciare investimenti di valore per la comunità aziendale e il territorio, anche di fronte a un immediato ritorno economico negativo. In questo senso, le interviste hanno evidenziato esempi concreti di politiche aziendali orientate al 5.0:

- **Infrastrutture ecosostenibili:** l'installazione e la fornitura di stazioni di ricarica per veicoli elettrici per l'uso gratuito da parte dei dipendenti, configurando un costo operativo diretto in perdita per l'azienda, mirato solo a incoraggiare la mobilità sostenibile;

- **Mobilità collaborativa (Car-sharing):** l'implementazione e il coordinamento di gruppi di car-sharing aziendali per flussi sistematici casa-lavoro, mirati a ridurre le emissioni complessive di anidride carbonica e a risparmiare carburante per la forza lavoro, senza alcun ritorno economico per l'azienda.

Sul piano della resilienza e della gestione delle perturbazioni, le grandi imprese dimostrano una solidità strutturale nettamente superiore. Eccetto il caso di grandi crisi sistemiche macroeconomiche che colpiscono in modo specifico il loro intero settore di riferimento, queste organizzazioni dispongono di architetture logistiche e industriali flessibili, che permettono loro di assorbire le anomalie e recuperare la piena capacità operativa in tempi estremamente rapidi.

Anche da una prospettiva di architettura tecnologica, le grandi imprese si dimostrano più mature e hanno un piano chiaro per proteggere i loro beni informativi. A differenza delle PMI, l'approccio all'Intelligenza Artificiale si concretizza nello sviluppo e nell'addestramento di IA interne e proprietarie, integrate nei server aziendali per compiti industriali e decisionali complessi. I piani di implementazione futuri sono sistematici e in espansione, segnando la transizione definitiva dall'uso marginale della tecnologia a un'architettura di produzione nativamente intelligente, sicura e centrata sull'uomo.

### **3.4 La convergenza tra i principi Lean, Industry 4.0 e Industry 5.0**

La conoscenza della Lean Production all'interno del campione aziendale esaminato risulta omogenea e completa a livello teorico e concettuale in tutte le

classi dimensionali. Tuttavia, nelle medie e nelle grandi imprese tale competenza si traduce in un approccio sistematico sul piano operativo, sebbene si riscontrino forti variazioni nei livelli di implementazione pratica dei singoli strumenti. Nei prossimi sottoparagrafi viene analizzato il livello di applicazione interna della filosofia Lean in relazione al dimensionamento dell'azienda.

### **3.4.1 Convergenza nelle Piccole Imprese**

Nelle imprese di piccole dimensioni, sebbene esista una comprensione di base dei concetti della Lean Production, i principi applicati sul campo riconducono per lo più a quella che può essere definita come una "Lean di buon senso". Le metodologie adottate non derivano da studi accademici strutturati o dall'applicazione pianificata di modelli teorici, ma nascono dalla ricerca empirica della metodologia di lavoro più efficiente per garantire la continuità operativa.

In base al settore specifico analizzato si notano, laddove possibile, piccoli interventi di manutenzione eseguiti direttamente sul posto di lavoro, una formazione interna dei dipendenti orientata a logiche sicure e riapplicabili, e una gestione quanto più ottimale possibile degli sprechi di materiale. Al contrario, si riscontrano evidenti debolezze nell'ottimizzazione sistematica del layout produttivo, nel controllo rigoroso del rispetto degli standard di sicurezza e nell'eliminazione pianificata dei tempi morti. In generale, la gestione dei muda è minima e rimane quasi interamente subordinata a una prospettiva economico-finanziaria di breve termine.

### **3.4.2 Convergenza nelle Medie Imprese**

Nelle imprese di medie dimensioni il know-how relativo alla Lean Production si dimostra molto approfondito e le applicazioni pratiche superano gli strumenti di base per abbracciare strategie più ampie e articolate. Spesso, tra le priorità strategiche dell'azienda vengono messi in primo piano la riprogettazione dei layout produttivi e l'ottimizzazione dei tempi morti nell'interazione uomo-macchina.

La formazione dei dipendenti viene frequentemente gestita all'interno dell'organizzazione attraverso il coinvolgimento di docenti specializzati o figure interne, ma viene quasi sempre affiancata da corsi di implementazione esterni volti a correggere eventuali problemi operativi e lacune conoscitive. La gestione dei muda segue criteri quanto più precisi possibili, sebbene rimanga confinata entro i limiti dell'efficienza dei costi di processo. Per quanto riguarda la gestione degli impianti, la manutenzione viene affidata a un gruppo esterno specializzato o a un team interno interamente dedicato; di conseguenza, risulta molto raro che l'operatore esegua interventi di manutenzione autonoma direttamente sulla propria postazione di lavoro.

### **3.4.3 Convergenza nelle Grandi Imprese**

Nelle imprese di grandi dimensioni la conoscenza della Lean Production e la sua relativa applicazione si attestano su livelli estremamente avanzati e strutturati. La gestione dei layout di fabbrica e la riduzione dei tempi morti sono

orientate alla totale automazione dei flussi, spinta fin dove risulta umanamente e tecnicamente possibile.

I metodi di formazione, sia interni che esterni, seguono schemi ai quali si aggiungono criteri di selezione stringenti e un elevato sbarramento iniziale per l'accesso a queste posizioni lavorative. La gestione dei muda viene affrontata in modo eccellente attraverso il riciclo sistematico degli scarti di lavorazione, la saturazione dei tempi morti e l'automazione dei servizi logistici ausiliari, come la gestione dei magazzini. Anche l'architettura della manutenzione prevede una forte integrazione operativa: i piccoli interventi di ripristino vengono effettuati direttamente sul posto di lavoro dall'operatore quando possibile, ma l'organizzazione dispone al contempo di un team interno specializzato per affrontare i problemi tecnici più complessi e i guasti di grande entità.

## Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha esaminato l'evoluzione dei modelli produttivi industriali, focalizzandosi in particolare sulla transizione dal paradigma tecnocentrico dell'Industry 4.0 verso la visione valoriale e antropocentrica dell'Industry 5.0, individuando nella **Lean 5.0** il framework metodologico di convergenza e integrazione. Se nell'ultimo decennio la digitalizzazione di massa è stata orientata quasi esclusivamente all'ottimizzazione quantitativa delle metriche operative e alla massimizzazione del profitto, l'avvento dell'Industry 5.0 ha ridefinito i confini dell'eccellenza operativa. Quest'ultima non può più essere misurata sulla base della sola efficienza economica, ma richiede il soddisfacimento simultaneo di tre pilastri imprescindibili: l'umanocentrismo, la sostenibilità ambientale e la resilienza sistemica di fronte agli shock esogeni.

La ricerca bibliografica e metodologica condotta ha evidenziato come la Lean 5.0 non rinneghi i traguardi tecnologici raggiunti dalla Lean 4.0, bensì ne

ampli significativamente l'orizzonte concettuale. Il concetto tradizionale di spreco (*muda*) è stato esteso fino a includere dimensioni precedentemente escluse dai modelli matematici classici, quali lo stress psicofisico e il carico cognitivo dell'operatore, l'inefficienza energetica dei processi e l'incapacità di una supply chain di assorbire le perturbazioni del mercato. Attraverso l'approccio del *Design for X* (DfX) integrato con i Sistemi Cyber-Fisici-Sociali (CPSS), è stato dimostrato come sia possibile mappare e governare questi nuovi vincoli operativi tramite parametri quantitativi e rigorosi, sin dalla fase di progettazione del sistema di produzione.

L'analisi empirica, condotta su un campione di cinque aziende manifatturiere italiane caratterizzate da differenti classi dimensionali, ha svelato un panorama nazionale fortemente eterogeneo. Il divario tecnologico e culturale emerso non risponde a dinamiche casuali, ma risulta strettamente correlato alla dimensione organizzativa delle imprese:

- **Le Grandi Imprese** dimostrano una maturità avanzata e una chiara predisposizione strategica verso la transizione 5.0. In tali realtà, la valorizzazione del fattore umano e la sostenibilità ecologica sono svincolate dalle mere logiche di profitto a breve termine; esse si traducono in investimenti strutturali che possono generare ritorni economici nulli o negativi nell'immediato (come i piani di mobilità collaborativa o lo sviluppo di infrastrutture ecosostenibili). L'adozione di soluzioni digitali sofisticate e l'implementazione di intelligenze artificiali proprietarie garantiscono a queste organizzazioni elevati standard di efficienza e una solida resilienza logistica.
- **Le Piccole e Medie Imprese (PMI)**, di contro, risentono di barriere all'entrata significative, principalmente di natura economico-finanziaria (elevati CAPEX tecnologici) e culturale. Nelle micro e piccole imprese la digitalizzazione si limita spesso a soluzioni commerciali in cloud per la gestione amministrativa, mentre la Lean Production viene applicata in modo informale, configurandosi come una sorta di "empirismo del buon

senso" piuttosto che come una metodologia strutturata. La sostenibilità viene percepita prevalentemente come un vincolo normativo o come un'opportunità di puro contenimento dei costi di processo, mentre la resilienza organizzativa conserva un carattere prettamente reattivo di fronte alle anomalie o alle crisi di mercato. Al fine di mappare i requisiti necessari a colmare tale divario e favorire una transizione efficace verso il nuovo paradigma, nella tabella 2 – principali bisogni delle imprese vengono sintetizzate i principali bisogni delle imprese — con particolare riferimento al contesto delle PMI — nel passaggio alla Lean 5.0.

**Tabella 2** – Principali bisogni delle imprese

| ID AZIENDA | INCENTIVI E SOSTENIBILITÀ | OTTIMIZZAZIONE LAYOUT E TEMPI MORTI | DIGITALIZZAZIONE E AUTOMAZIONE | RESILIENZA |
|------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------|
| AZIENDA 1  | <b>X</b>                  |                                     | <b>X</b>                       | <b>X</b>   |
| AZIENDA 2  |                           |                                     |                                |            |
| AZIENDA 3  | <b>X</b>                  |                                     | <b>X</b>                       | <b>X</b>   |
| AZIENDA 4  | <b>X</b>                  | <b>X</b>                            |                                | <b>X</b>   |
| AZIENDA 5  | <b>X</b>                  |                                     | <b>X</b>                       | <b>X</b>   |

In conclusione, affinché il paradigma dell'Industry 5.0 possa diffondersi capillarmente all'interno del tessuto industriale italiano — costituito in larga

prevalenza da PMI —, è fondamentale superare l'approccio reattivo che ne limita lo sviluppo. Strumenti di politica industriale come il *Piano Transizione 5.0* risultano cruciali per mitigare il rischio finanziario e incentivare gli investimenti in capitale fisso e tecnologico. Tuttavia, la vera sfida per gli ingegneri gestionali del futuro sarà quella di guidare un profondo cambiamento culturale: un processo di sintesi capace di coniugare la flessibilità e la creatività dell'essere umano con la potenza computazionale dei sistemi intelligenti, trasformando l'efficienza da semplice metrica aziendale a motore di benessere sociale e responsabilità ambientale.

## Bibliografia e Sitografia

1. Marco Giannini "Industria 4.0: Attualità e prospettive
2. Enrico Aramini, *"Industry 4.0: Manuale di Evoluzione Industriale"*.
3. Acatech - National Academy of Science and Engineering, *"Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group"*, 2013.
4. Armando Martin, *"Industria 4.0. Sfide e opportunità per il Made in Italy"*, Editoriale Delfino. Si veda anche l'osservatorio e portale di divulgazione

- C/Quadra (Automazione Plus): <https://www.automazioneplus.it/c-quadra>
5. Dora Anna Rocca-Paolo Marraffa "Verso la Society 5.0"
  6. Maurizio Bevilacqua, Introduzione Industry 4.0, Slide interne del corso.
  7. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation; Müller, J., *"Enabling Technologies for Industry 5.0 – Results of a workshop with Europe's technology leaders"*, Publications Office, 2020. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/082634>
  8. European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, Breque, M., De Nul, L. and Petridis, A., *Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*, Publications Office of the European Union, 2021, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407>
  9. United Nations, *"Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development"* (Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile).
  10. <https://www.mimit.gov.it/it/incentivi/piano-transizione-5-0>
  11. European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, *Industry 5.0 – Human-centric, sustainable and resilient*, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/073781>
  12. Zizic, M. C., Mladineo, M., Gjeldum, N., & Celent, L. (2022). From Industry 4.0 towards Industry 5.0: A Review and Analysis of Paradigm Shift for the People, Organization and Technology. *Energies*, 15(14), 5221. <https://doi.org/10.3390/en15145221>
  13. Arnette AN, Brewer BL, Tyler C (2014) Design for sustainability (DFS): the intersection of supply chain and environment.
  14. Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Tseng, M. L., Grybauskas, A., Stefanini, A., & Amran, A. (2023). Behind the definition of Industry 5.0:

a systematic review of technologies, principles, components, and values.  
Journal of Industrial and Production Engineering.

15. Vaezinejad, S., Schniederjans, D. (2024). Lean Supply Chain 5.0 Management (LSCM 5.0): Lean and Value Reconceptualized. In: Sarkis, J. (eds) The Palgrave Handbook of Supply Chain Management. Palgrave Macmillan, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-19884-7\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-19884-7_22)

# Ringraziamenti

Finalmente arrivati qui

Un grazie speciale nei ringraziamenti va sicuramente alla mia famiglia, che mi ha permesso di studiare e supportato durante tutto il percorso. Ringrazio mio padre Andrea che mi spronava (anche troppo) ad andare agli esami anche quando non mi sentivo pronto, mia madre Ida che ogni volta che tornavo a casa mi faceva sentire come ci fosse una festa ed a mio fratello Simone per la comprensione e l'aiuto che solo un fratello può darti. Un ringraziamento importante va anche a nonna Concetta che ad ogni singolo esame che facevo chiedeva com'era andata ed anche quando la risposta era negativa sapevo che invece di giudicarmi la domanda successiva era cosa volessi da mangiare.

Desidero esprimere un sentito ringraziamento anche al Prof. Bevilacqua ed alla Prof.ssa Lucantoni, sempre disponibili per un chiarimento ed un aiuto, è stato un onore ed un piacere averli come Relatore e Co-Relatore.

Passando ora agli amici, ultimi non per importanza, anzi forse il contrario vorrei ringraziarvi tutti ma fortunatamente siete davvero troppi, da quelli che ho in Abruzzo, quelli a Fermo, quelli all'Aquila e tutti quelli che sono in giro per l'Italia quindi perdonami se non mi soffermo singolarmente.

Agli amici in Abruzzo, è sempre un piacere rivederci, che dico in Abruzzo ma in realtà anche voi siete tutti sparsi per l'Italia chi per lavoro e chi per studio ed oramai son poche le volte in cui usciamo ma ogni volta che usciamo sembra non abbiamo mai smesso di vederci.

Agli amici qui a Fermo, grazie mille per tutte le serate, gli appunti, la motivazione di andare all'esame, i giorni passati a studiare (inutilmente, avevamo solo più ansia) insieme. Sono completamente sicuro che senza di voi questo percorso sarebbe stato molto più lungo, difficile e soprattutto noioso.

Ci tengo a ringraziare infine Carlo che ormai mi sopporta da dieci anni, sia alle superiori che all'università, grazie per tutte le chiamate e messaggi che variavano da organizzare serate, a cosa fare per un esame o semplicemente per parlare eri sempre disponibile.

Ho detto a tutti che avrei usato questa frase quindi quale punto migliore della fine per metterla, grazie mille a tutte le persone che in questi anni mi hanno supportato e soprattutto supportato non ce l'avrei mai fatta senza di voi.