



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale/magistrale INGEGNERIA GESTIONALE

**DAL MIGLIORAMENTO CONTINUO ALLA DIGITALIZZAZIONE - UN MODELLO
CONGIUNTO PER LA COMPETITIVITÀ INDUSTRIALE**

**FROM CONTINUOUS IMPROVEMENT TO DIGITALIZATION - A JOINT MODEL FOR
INDUSTRIAL COMPETITIVENESS**

Relatore: Chiar.mo/a

Prof./Prof.ssa **SARA ANATOMARIONI**

Tesi di Laurea di:

DIEGO MIGLIORE

A.A. 2025/2026

*A nonna Pina e a nonno Giacomo,
che non hanno potuto vedere questo traguardo,
ma che vivono costantemente in me.
A tutti i progetti e i sogni che avevamo costruito insieme.
Dedico tutto questo a voi,
che siete stati e siete tuttora la mia forza.
E proprio come dicevi tu, nonna:
“chi prova dolore sorride il doppio”,
e oggi sorrido anche per voi.*

Indice generale

Introduzione	1
Capitolo 1 - Lean thinking e Digitalizzazione	3
Capitolo 2 - Integrazione tra Lean Production e Digitalizzazione	7
Capitolo 3 - Metodologia e revisione della letteratura	9
3.1 - Analisi della letteratura e discussione dei risultati	12
Capitolo 4 - Analisi bibliometrica e network delle parole chiave	23
4.1 - Analisi geocentrica e accoppiamento bibliografico tra paesi	24
4.2 - Rete di co-occorrenza delle parole chiave (co-occurrence network analysis)	26
4.3 - Evoluzione temporale delle parole chiave: traiettorie e mutazioni di paradigma (thematic evolution)	29
Capitolo 5 - Framework applicativo della Lean 4.0: superamento della dicotomia tra efficienza tradizionale e innovazione digitale	33
5.1 - Diagnosi e stabilità del processo: il ruolo della mappatura preventiva e della standardizzazione prima dell'adozione tecnologica	33
5.2 - Approccio alla sperimentazione: le modalità di validazione graduale delle soluzioni tecnologiche in ottica Lean	35
5.3 - Gestione del capitale umano: l'evoluzione delle competenze e delle soft skills necessarie per la transizione	36
5.4 - Il nuovo ruolo manageriale: il processo decisionale guidato dai dati e l'importanza del presidio diretto sul Gemba	37
5.5 - Monitoraggio delle criticità: l'analisi dei potenziali rischi organizzativi e tecnici derivanti dall'automazione	38
5.6 - Sostenibilità integrata: il legame tra efficienza operativa e raggiungimento degli obiettivi ESG	40
5.7 - Pianificazione degli investimenti: massimizzare il ROI attraverso l'agilità e il retrofitting	41
Conclusioni	43
Bibliografia	45

Introduzione

I moderni scenari manifatturieri sono caratterizzati da un'elevata complessità, dettata dalla globalizzazione dei mercati, dal cambiamento del ciclo di vita dei prodotti e dalla necessità di rispettare stringenti parametri di sostenibilità economica e ambientale. In questo contesto, le imprese sono chiamate a una strutturale revisione dei propri modelli organizzativi. Il presente lavoro di tesi, dal titolo “Dal miglioramento continuo alla digitalizzazione - un modello congiunto per la competitività industriale”, nasce con l'obiettivo di esplorare l'evoluzione della gestione aziendale, partendo dai concetti storici della Qualità Totale per giungere al paradigma emergente della “Lean 4.0”, in cui l'efficienza tradizionale si fonde con le tecnologie abilitanti della Quarta Rivoluzione Industriale.

Nell'attuale dibattito ingegneristico si tende spesso a percepire una potenziale dicotomia tra l'approccio snello, tipicamente focalizzato sull'eliminazione visiva degli sprechi, e l'automazione digitale guidata dai Big Data e dall'Internet of Things. L'obiettivo centrale di questo elaborato è dimostrare come tale dicotomia risulti fittizia: la letteratura e l'evidenza empirica confermano infatti che la tecnologia, se innestata su processi non preventivamente mappati e standardizzati, genera esclusivamente “Digital Waste”, cioè spreco digitale. Al contrario, l'eccellenza operativa si persegue unicamente inquadrando la fabbrica come un ecosistema sociotecnico, in cui il Lean Thinking costituisce l'infrastruttura organizzativa essenziale prim'ancora di procedere alla digitalizzazione.

Per rispondere a tali ipotesi di ricerca, il lavoro è stato strutturato in tre fasi metodologiche sequenziali.

La prima fase di esplorazione ha permesso di definire il perimetro manageriale e tecnologico di indagine. Attraverso un'analisi preliminare della letteratura ingegneristica, sono stati identificati i fondamenti teorici dell'ottimizzazione dei processi e le criticità emergenti legate alla transizione digitale. Tale indagine è risultata essenziale per consolidare la terminologia tecnica, definire il contesto industriale di riferimento e individuare le parole chiave (keywords) necessarie per strutturare in modo rigoroso la successiva ricerca sistematica.

La seconda fase, dedicata alla revisione sistematica della letteratura, sposta l'indagine allo stato dell'arte accademico internazionale. Per garantire il massimo rigore scientifico, è stato adottato il protocollo internazionale PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). L'estrazione e lo screening di articoli scientifici dai principali database hanno permesso di definire un campione consistente, successivamente sottoposto ad analisi bibliometrica. L'impiego del

software Biblioshiny, inoltre, ha consentito di generare mappe di co-occorrenza e diagrammi, i quali hanno validato visivamente e quantitativamente le traiettorie di sviluppo della Lean 4.0.

Infine, la terza fase di analisi e sintesi si concretizza nella proposta di un Framework applicativo destinato al management. Andando oltre la descrizione teorica, la tesi fornisce una critica ingegneristica per l'implementazione aziendale della Lean 4.0. In quest'ultima sezione viene dimostrato come il superamento della dicotomia tra uomo e macchina avvenga tramite processi decisionali guidati dai dati (Data-Driven), la validazione guidata dalle tecnologie, la riqualificazione del capitale umano e l'allineamento dell'efficienza produttiva con i moderni obiettivi ESG (Environmental, Social, Governance).

Capitolo 1

Lean thinking e Digitalizzazione

Il Lean Thinking non è un semplice algoritmo o un insieme di strumenti, ma rappresenta una vera e propria “filosofia di gestione” il cui scopo ultimo è la ricerca della perfezione attraverso il miglioramento e il cambiamento continuo, noto nella terminologia giapponese come Kaizen (*Lean Production*, n.d.). Questo approccio organizzativo, derivato storicamente dal Toyota Production System, si fonda su cinque pilastri cardine strettamente interconnessi tra di loro. Il primo passo consiste nel definire il “Valore” (Value) in modo rigoroso dal punto di vista del cliente finale, in quanto il valore è per sua natura soggettivo e deve corrispondere esattamente alle percezioni, alle esigenze e alle aspettative del mercato, andando a considerare “spreco” qualsiasi utilizzo di risorse che non generi tale valore (*Lean Production*, n.d.). Una volta compreso cosa generi valore, l’azienda deve procedere con l’identificazione del “Flusso del valore” (Stream), mappando in modo dettagliato tutte le attività necessarie per la realizzazione del prodotto o servizio (Value Stream Mapping); questa analisi è fondamentale per distinguere le attività a valore aggiunto da quelle necessarie ma non a valore, isolando ed eliminando sistematicamente ogni forma di spreco, definita “Muda” (*Lean Production*, n.d.). Successivamente, è imperativo “far scorrere questo flusso in modo continuo” (Flow), abbandonando le tradizionali logiche di produzione a lotti e code, tipiche dei sistemi “Push”, in favore di un processo fluido e privo di interruzioni (*Lean Production*, n.d.). Questa continuità permette di implementare un “Sistema tirato” (Pull), gestito spesso tramite logiche a cartellino come il “Kanban”, nel quale le risorse e i materiali vengono forniti ed elaborati esclusivamente sulla base del reale consumo e della domanda effettivamente manifestata dal cliente, azzerando quindi il rischio di sovrapposizione (*Lean Production*, n.d.). L’impiego costante di questi principi converge verso l’ultimo pilastro, ovvero la ricerca della “Perfezione”, che non è altro che un traguardo asintotico perseguito attraverso il Kaizen, miglioramenti gradualmente che mirano all’eliminazione totale delle inefficienze (*Lean Production*, n.d.).

Per comprendere a fondo l’eliminazione delle inefficienze e degli sprechi, la filosofia Lean classifica le criticità operative in tre grandi macrocategorie, note come le “3M”: Mura (l’irregolarità e l’instabilità del processo), Muri (il sovraccarico fisico o mentale di operatori e macchinari) e infine i Muda (sprechi veri e propri) (*Understanding Lean Thinking and Practice Fundamentals*, n.d.). Questi ultimi si distinguono ulteriormente in due tipologie: i Muda di “Tipo Uno”, i quali comprendono le attività che non creano valore ma che non possono essere eliminate a causa degli attuali vincoli

tecnologici o normativi, e i Muda di “Tipo Due”, che consistono in attività totalmente prive di valore e che devono essere eliminate immediatamente (*Lean Production*, n.d.; *Understanding Lean Thinking and Practice Fundamentals*, n.d.). La letteratura snella codifica sette tipologie principali di spreco sistematico che affliggono i processi non ottimizzati: la sovrapproduzione (produrre più del richiesto o in anticipo), i tempi di attesa (code di materiali o operatori inattivi), i trasporti inutili di materiali, i processamenti eccessivi (lavorazioni non richieste dal cliente), le scorte e giacenze in eccesso, i movimenti inutili del personale (dovuti a scarsa ergonomia o disorganizzazione) ed infine i difetti, che generano scarti e costose rilavorazioni (9.-*QUALITA' E MIGLIORAMENTO CONTINUO*, n.d.; *Lean Production*, n.d.). L'accumulo di scorte, in particolare, viene paragonato nella letteratura di settore al livello dell'acqua in un fiume: un livello alto nasconde gli “scogli” (problemi del processo come guasti o assenteismo), e solo abbassando le scorte i problemi storici diventano evidenti e affrontabili (9.-*QUALITA' E MIGLIORAMENTO CONTINUO*, n.d.).

Per stabilizzare i processi e far emergere questi sprechi, la Lean impiega strumenti metodologici rigorosi, primo fra tutti l'approccio “5S”. Questa tecnica mira a organizzare il posto di lavoro ripristinando le condizioni operative ottimali attraverso cinque fasi: Seiri (separare l'utile dall'inutile), Seiton (ordinare razionalmente gli spazi per rendere tutto più reperibile e facilmente utilizzabile), Seiso (pulire e ispezionare costantemente per ripristinare gli standard di manutenzione delle macchine), Seiketsu (standardizzare le procedure visive e mantenere il livello di operatività delle prime 3S) e Shitsuke (mantenere e rispettare il rigore nel tempo andando a definire gli strumenti di verifica necessari per la revisione periodica) (9.-*QUALITA' E MIGLIORAMENTO CONTINUO*, n.d.; *Lean Production*, n.d.). Solo una volta raggiunta la stabilità tramite le 5S, il miglioramento continuo (Kaizen) può essere guidato scientificamente dal ciclo PDCA, noto anche come “Ruota di Deming”. Questo algoritmo iterativo si articola in quattro precise fasi: “Plan”, cioè definire il problema tramite motivazioni e ragioni per le quali affrontarlo, misurare la situazione di partenza e pianificare gli obiettivi, impostando a modo il progetto raccogliendo tutti i dati e le informazioni necessarie; “Do”, ossia implementare le azioni correttive decise nel punto precedente addestrando il personale incaricato; “Check”, che consiste nella verifica oggettiva e scrupolosa dei risultati ottenuti rispetto agli obiettivi prefissati; “Act”, che si raggiunge con il successo del piano, per andare a standardizzare le soluzioni di successo in modo da renderle irreversibili, oppure, in caso di fallimento, ricominciare con il ciclo sullo stesso problema.(9.-*QUALITA' E MIGLIORAMENTO CONTINUO*, n.d.; *Understanding Lean Thinking and Practice Fundamentals*, n.d.; Della Comunicazione Aziendale & Nicotra, n.d.)

Tuttavia, è fondamentale sottolineare che la Lean si configura in primis una strategia culturale e di mentalità. L'esperienza decennale dimostra che le trasformazioni industriali falliscono o hanno un

successo non tanto per gli strumenti adottati, quanto a causa della mentalità e dei comportamenti dei leader e dei dipendenti. (*Industry 4.0 Demystified-Lean's next Level*, n.d.). Un processo di trasformazione realmente efficace richiede un profondo cambiamento manageriale, basato sul rispetto per le persone, sull'ascolto attivo e sull'osservazione diretta e partecipativa sul campo operativo, pratica nota come “gemba” (Della Comunicazione Aziendale & Nicotra, n.d.).

Alla luce delle inefficienze che emergono quando le tecnologie vengono utilizzate in contesti produttivi non ottimizzati, risulta evidente che la sola adozione dell'Industria 4.0 rischia di fallire se non viene accompagnata da un ripensamento dei prerequisiti organizzativi e gestionali (*Industria 4.0 e Simulazione Di Impianti Industriali*, n.d.).

Il paradigma dell'Industria 4.0, nato formalmente in Germania nel 2011 per far fronte alla crescente complessità dei processi e dei prodotti, si basa su un ecosistema di Tecnologie Abilitanti (KETs) che fanno da pilastri al sistema: Simulazione, Big Data, Additive Manufacturing, Robot Autonomi, Realtà Aumentata, Cloud Computing, Cybersecurity, Internet of Things e System Integration (*Industria 4.0 e Simulazione Di Impianti Industriali*, n.d.)

Analizzando la letteratura aziendale, pur non essendoci una distinzione didascalica formale, l'evoluzione del concetto emerge chiaramente dalle sue applicazioni, suddividendosi in tre fasi. La prima è la “Digitization” (Dematerializzazione), intesa come il semplice passaggio delle informazioni dal supporto cartaceo a quello digitale. Ad esempio, il passaggio da istruzioni di assemblaggio cartacee (che inibiscono la gestione delle performance a causa dei ritardi di elaborazione) a terminali digitali sul campo (*Industry-4-0-Capturing-Value-at-Scale-in-Discrete-Manufacturing-Vf*, n.d.). Il secondo stadio è la “Digitalization” (Digitalizzazione dei processi), che consiste nell'uso dei dati digitali per connettere operativamente i processi e le attività; in ambito automotive, aziende come Mercedes Benz la definiscono come la digitalizzazione dell'intera catena del valore, dalla progettazione alla produzione fino all'assistenza (*Industria 4.0 e Simulazione Di Impianti Industriali*, n.d.). L'ultimo livello è la “Digital Transformation” (Trasformazione Digitale), un impatto su larga scala che altera l'intero modello di business e la cultura aziendale e d'impresa, richiedendo la creazione di veri e propri “ecosistemi digitali integrati” e il coinvolgimento e la formazione di tutto il personale, dai vertici fino alle singole unità operative (*Digital Manufacturing-Escaping Pilot Purgatory*, n.d.).

Tra le tecnologie cardine di questa trasformazione spicca il “Digital Twin” (Gemello Digitale), che estende la modellazione di simulazione a tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto. Il Digital Twin permette un accumulo di conoscenze in cui le informazioni generate in una fase vengono archiviate e sfruttate nelle successive (*Industria 4.0 e Simulazione Di Impianti Industriali*, n.d.). L'inserimento

di queste intelligenze artificiali porta alla creazione dei Sistemi Cyber-Fisici (CPS), definiti come reti di elementi autonomi e cooperativi che fondono il mondo virtuale delle computazioni con il mondo fisico della produzione, andando a migliorare i processi decisionali in tempo reale e favorendo l'auto-organizzazione degli impianti (*Industria 4.0 e Simulazione Di Impianti Industriali*, n.d.).

L'inserimento di queste tecnologie in processi non ottimizzati e disorganizzati a monte genera blocchi e inefficienze. I documenti evidenziano che senza un'infrastruttura logica solida si verificano "blocking issues" come: ritardi cronici nei dati e nel loro aggiornamento (con latenze fino a 45 minuti), mancanza di flessibilità e scalabilità nei sistemi di raccolta e inesattezze dei dati dovute a errori di calcolo che vengono ripetuti ed amplificati dal sistema informatico (*Digital Manufacturing-Escaping Pilot Purgatory*, n.d.).

Infatti, il paradigma tedesco dell'Industria 4.0 nasce da prerequisiti organizzativi avanzati (ERP diffusi, Supply Chain integrata, Lean Production); applicare le tecnologie "alla cieca" in aziende sprovviste di queste basi, come molte PMI italiane, rischia di risultare inefficace e di esporle a forti perdite economiche, rendendo necessario ripensare prima i prerequisiti stessi. (*Industria 4.0 e Simulazione Di Impianti Industriali*, n.d.)

Capitolo 2

Integrazione tra Lean Production e Digitalizzazione

Questa constatazione rende essenziale superare la visione separata dei due approcci per esplorarne la convergenza: l'Industria 4.0 debba essere intesa come una "Lean abilitata digitalmente", un modello capace di elevare i principi storici del Toyota Production System al loro livello successivo (*Industry 4.0 Demystified-Lean's next Level*, n.d.). In questo ecosistema, le logiche snelle fungono da regolatore, mentre le tecnologie digitali agiscono da acceleratore: l'acquisizione continua di nuovi dati dai sensori IoT e l'analisi avanzata (Advanced Analytics) potenziano significativamente la capacità del capitale umano di risolvere i problemi (*Industry 4.0 Demystified-Lean's next Level*, n.d.).

L'accelerazione tecnologica del miglioramento continuo trova riscontro in molteplici applicazioni industriali. L'utilizzo della Realtà aumentata (AR), ad esempio, combinando i vantaggi della tecnologia informatica con i dispositivi visivi (Heads Up Display), permette di proiettare informazioni supplementari e istruzioni operative standard interattive direttamente nel campo visivo dell'operatore, abbattendo i tempi di apprendimento e riducendo drasticamente gli errori umani (*Industria 4.0 e Simulazione Di Impianti Industriali*, n.d.). Sul fronte analitico, l'automazione del controllo qualità basata su telecamere intelligenti, come nel caso Ford, crea un ciclo di controllo chiuso (closed quality loop) che identifica istantaneamente i difetti in linea e indirizza proattivamente i parametri di correzione direttamente ai macchinari, generando un significativo valore aggiunto (*Industry-4-0-Capturing-Value-at-Scale-in-Discrete-Manufacturing-Vf*, n.d.). Inoltre, il citato "Digital Twin" (Gemello digitale) funge da acceleratore in tre modalità specifiche: consente l'addestramento offline in un ambiente virtuale privo di rischi economici (annullando i danni da inesperienza), permette un controllo anticipatorio in linea dove il modello virtuale segnala immediatamente derive comportamentali della macchina reale rispetto agli standard, e fornisce infine la base per l'auto-consapevolezza della macchina stessa, capace di diagnosticare guasti autonomamente (*Industria 4.0 e Simulazione Di Impianti Industriali*, n.d.).

In senso inverso e complementare, la filosofia Lean gioca un ruolo vitale nell'evitare la creazione di "digital waste" (spreco digitale) imponendo la stabilità e l'efficienza del processo prima della sua automazione e impedendo all'azienda di automatizzare processi intrinsecamente inefficienti. Uno degli errori manageriali più comuni e gravi è infatti quello di investire prematuramente nel miglioramento tecnologico o nell'acquisto di costosi equipaggiamenti prima di aver ottenuto una

stabilità di base, la quale è “condizione necessaria per studiare i processi e conoscerli veramente” (Della Comunicazione Aziendale & Nicotra, n.d.).

Un esempio di questa integrazione virtuosa è riscontrabile nel processo di “Retrofitting” (ammodernamento tecnologico di vecchi macchinari). Piuttosto che incorrere in tempi e costi insostenibili per la sostituzione integrale degli impianti obsoleti con nuovi sistemi 4.0, l’azienda snella opta per un adeguamento mirato (*Industria 4.0 e Simulazione Di Impianti Industriali*, n.d.). Questo approccio non parte mai dalla tecnologia, ma segue un rigoroso metodo Lean: la prima fase impone la “definizione degli obiettivi aziendali”, come il miglioramento dell’ergonomia o la riduzione dei difetti; la seconda fase richiede un’analisi della situazione “AS-IS” attraverso la mappatura del flusso del valore per classificare le attività, identificare i Muda e definire le reali variabili di processo che necessitano di essere misurate (*Industria 4.0 e Simulazione Di Impianti Industriali*, n.d.). Solo in seguito a questa profonda fase di ottimizzazione preventiva si passa alla fase tecnologica vera e propria: la definizione e installazione del nuovo hardware (sensori IoT), l’adeguamento dei protocolli di comunicazione su piattaforme Cloud Storage per la condivisione rapida e simultanea dei dati, e infine lo sviluppo di interfacce utente intuitive (*Industria 4.0 e Simulazione Di Impianti Industriali*, n.d.). Inoltre, per scongiurare del tutto gli sprechi di capitale, l’approccio Lean subordina queste innovazioni a logiche di sperimentazione graduale basate sul concetto di “Minimum Viable Product” (MVP): implementazioni minime e a basso costo che consentono rapidi cicli di validazione sul campo (PDCA) per testare il reale valore di business, prima di deliberare costosi rollout aziendali su scala globale (*Industry-4-0-Capturing-Value-at-Scale-in-Discrete-Manufacturing-Vf*, n.d.).

Capitolo 3

Metodologia e revisione della letteratura

PAROLE CHIAVE:

KAIZEN

LEAN PRODUCTION

LEAN THINKING

VALUE STREAM MAPPING

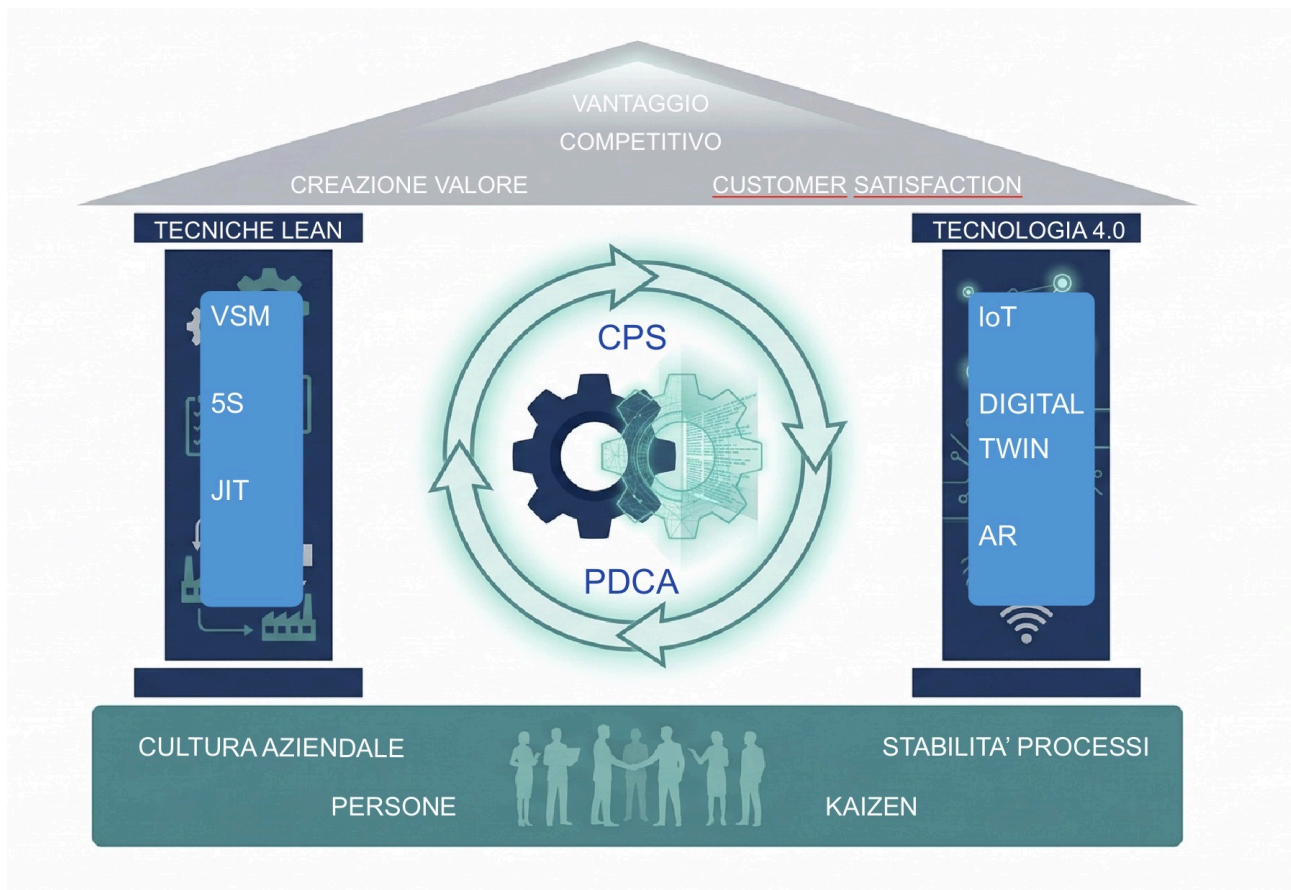
INDUSTRY 4.0

DIGITALIZATION

INTERNET OF THINGS

DIGITAL TWIN

DIGITAL WASTE



(Immagine generata da IA)

Con lo scopo di esplorare le intersezioni teoriche e applicative tra le metodologie Lean e le tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0, l'analisi della letteratura è stata condotta seguendo un approccio strutturato e rigoroso. Per garantire la trasparenza, la riproducibilità e la solidità scientifica della ricerca, è stato adottato il protocollo internazionale PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), articolando il processo di selezione degli studi in quattro fasi sequenziali: identificazione, screening, eleggibilità e inclusione.

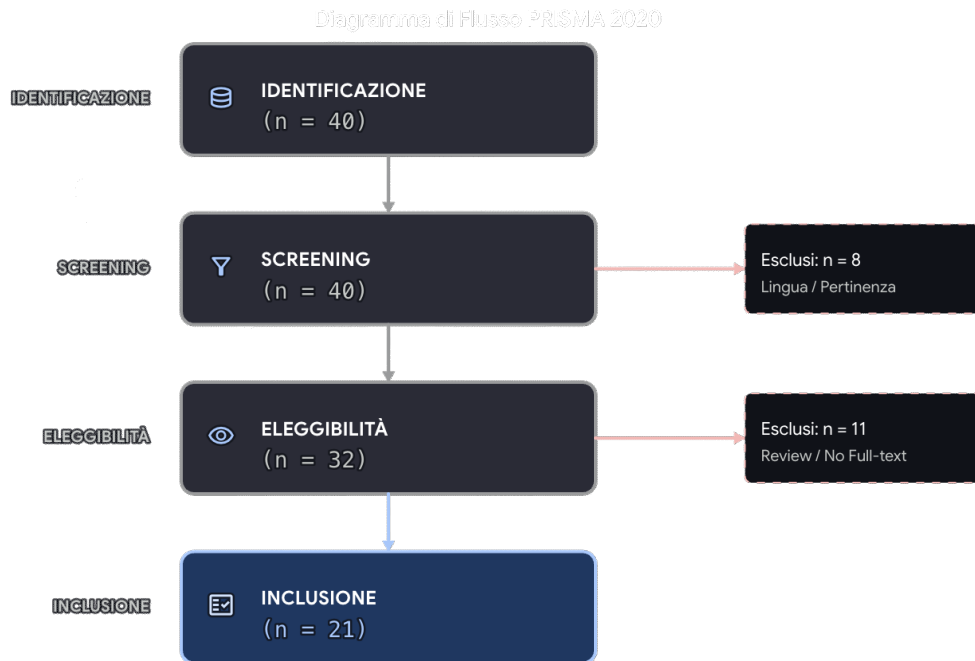
La fase iniziale di identificazione è stata effettuata interrogando il database scientifico internazionale Scopus, il quale garantisce l'accesso a contributi accademici peer-reviewed di elevato rigore ingegneristico e gestionale. La strategia di ricerca è stata costruita incrociando due insiemi di parole chiave tramite l'utilizzo di operatori booleani. Il primo set tematico ha racchiuso i concetti cardine del miglioramento continuo (come "Lean manufacturing", "Continuous improvement" e "Value Stream Mapping"), mentre il secondo set si è focalizzato sulle tecnologie della digitalizzazione (tra cui "Industry 4.0", "Digital Twin", "Industrial Iot" e "Digital Waste"). Limitando l'indagine ai termini

presenti nel titolo, nell'abstract e nelle keyword degli articoli, è stato possibile estrarre un bacino di partenza di circa quaranta contributi potenzialmente rilevanti.

Successivamente, durante la fase di screening, questo campione iniziale è stato sottoposto a una prima procedura di filtraggio per raffinare la pertinenza. In questo stadio è stato applicato un rigoroso filtro linguistico, escludendo gli articoli non redatti in lingua inglese (rimuovendo, ad esempio, contributi in lingua spagnola) al fine di mantenere uno standard accademico internazionale. Inoltre, per focalizzare l'elaborato esclusivamente sui traguardi empirici più recenti e innovativi, sono stati scartati a priori i documenti non strettamente allineati con gli assi di ricerca tecnici, riducendo così in modo fisiologico la numerosità del campione.

Il processo è poi proseguito con la fase di eleggibilità, che ha previsto l'analisi approfondita dei testi integralmente accessibili. I documenti per i quali non è stato possibile reperire il full-text, a causa di limitazioni di licenza sui portali di editori esterni non riconosciuti dal proxy dell'Ateneo, sono stati scartati. In ottemperanza all'obiettivo della tesi (ovvero l'analisi di risultati misurabili e tangibili) sono stati applicati rigidi criteri di esclusione. Nello specifico, sono state rimosse tutte le rassegne letterarie (Literature e Systematic Review) in quanto raccolte secondarie di lavori preesistenti, e sono stati estromessi gli studi basati unicamente su modelli teorici, sondaggi d'opinione o panel di esperti privi di applicazioni in contesti operativi. L'attenzione si è dunque concentrata esclusivamente su quegli articoli che presentavano casi studio industriali reali o simulazioni avanzate dotate di indicatori di prestazione (KPI) oggettivamente misurabili.

Infine, al termine del processo di inclusione, il campione definitivo ammesso alla revisione sistematica si è assestato a ventuno articoli. Tale set di documenti, seppure quantitativamente ridotto rispetto all'estrazione iniziale, risulta altamente pertinente in quanto composto interamente da casi studio empirici. Il raggiungimento di questo bacino altamente focalizzato fornisce una base di dati sufficientemente robusta per analizzare e delineare con chiarezza le tendenze attuali dell'integrazione tra logiche snelle e digitalizzazione.



3.1

Analisi della letteratura e discussione dei risultati

La revisione sistematica della letteratura ha permesso di isolare i casi studio necessari a dimostrare come l'integrazione tra metodologie Lean e tecnologie 4.0 generi un concreto vantaggio competitivo. Per effettuare una critica ingegneristica approfondita, i contributi sono stati raggruppati e analizzati secondo quattro macro-assi tematici: l'efficienza operativa (Iot e controllo qualità), la gestione logistica (simulazione e robotica), le dimensioni organizzative (fattore umano) e l'impatto sulla sostenibilità.

Il primo asse di analisi indaga in profondità l'impatto dell'Industrial Internet of Things (Iot) e delle interfacce digitali sull'efficienza operativa e sull'eliminazione sistematica degli sprechi, noti nella dottrina snella come "Muda". La letteratura ingegneristica evidenzia come la connessione in tempo reale dei macchinari permetta di superare i limiti fisiologici della raccolta dati manuale, storicamente soggetta a ritardi, approssimazioni ed errori umani. Un caso studio rilevante, condotto all'interno di un reale impianto per lo stampaggio plastico a iniezione, dimostra come l'estrazione massiva di dati

Iot e la loro successiva pulizia tramite algoritmi di classificazione avanzata (come l'XGBoost) consentano di monitorare e intervenire rapidamente sui tempi di inattività anomala delle macchine in tempo reale (Wu et al., 2023). L'applicazione di questa rigorosa architettura data-driven ha permesso all'azienda di ricalcolare e ottimizzare i tempi di transito logistico interno, registrando abbattimenti drastici dei tempi di attesa e di trasporto, con punte di riduzione del 91.86% nel passaggio critico tra il magazzino e il reparto di assemblaggio, trasformando di fatto un processo non tracciabile in un flusso costantemente monitorato (Wu et al., 2023).

La digitalizzazione delle informazioni ha un impatto analogo a livello manageriale, trasformando radicalmente le pratiche di Visual Management all'interno dei reparti (Shop Floor). Il principio snello della gestione a vista si basa sull'assunto che condividere le informazioni in modo chiaro permetta di identificare immediatamente le anomalie, seguendo il paradigma secondo cui "vedere insieme" permette di "agire insieme". Uno studio condotto presso lo stabilimento slovacco Schaeffler ha analizzato nel dettaglio la transizione dalle tradizionali lavagne visive manuali cartacee al digital Shop Floor Management (dSFM) (Mesarosova et al., 2024). I rilevamenti operativi, condotti tramite la tecnica del Workday Snapshot (il campionamento di attività giornaliere), hanno certificato che la dematerializzazione elimina i processamenti eccessivi e i movimenti inutili del personale direttivo: il tempo dedicato alla mera trascrizione e raccolta dei dati, che nel sistema predigitale assorbiva quasi il 16% del turno di un operaio e il 26% di un team leader, è stato drasticamente abbattuto (Mesarosova et al., 2024). Tuttavia, l'analisi critica di questo studio rivela un aspetto di forte interesse organizzativo: l'introduzione dei nuovi terminali ha generato un momentaneo incremento (fino al 47%) dei tempi di permanenza al computer per i team leader a causa di problemi tecnici e di interfacciamento IT, dimostrando che l'adozione tecnologica richiede sempre un adeguato periodo di rodaggio e adattamento formativo (Mesarosova et al., 2024).

Sotto il profilo del controllo della qualità, l'integrazione del paradigma 4.0 eleva il principio storico del "Jidoka" (automazione dotata di tocco umano) e dei dispositivi Poka-Yoke a nuovi standard di eccellenza industriale. La dottrina Lean definisce il Poka-Yoke come un meccanismo o una scelta progettuale a "prova di errore", concepita per porre dei limiti fisici o logici alle operazioni in modo da impedire all'operatore di compiere sbagli involontari e generare difetti. L'evoluzione di questi tradizionali sistemi antierrone meccanici verso i cosiddetti Digital Poka-Yoke, supportati da sensori ottici e interfacce digitali, si è rivelata determinante per l'azzeramento degli scarti in linea. L'implementazione congiunta della rigorosa metodologia Six Sigma (in particolare il ciclo DMAIC) e di controlli Poka-Yoke digitali in un'azienda produttrice di complesse attrezzature per il degassaggio sottovuoto ha generato un salto prestazionale netto (Rahardjo et al., 2023). Le rilevazioni sul campo hanno evidenziato che il processo produttivo (yield) ha raggiunto una resa del 100%, mentre l'indice

ingegneristico di capacità di processo (Cpk) è balzato da un valore iniziale di 1,278 a un 2,0, certificando una stabilità statistica inattaccabile, una riduzione degli scarti e un conseguente risparmio economico diretto per l'impresa stimato in decine di migliaia di dollari (Rahardjo et al., 2023).

Per concludere, l'evidenza empirica derivante dall'analisi della letteratura dimostra che l'uso sinergico di strumenti metodologici snelli (come la Value Stream Mapping per mappare il flusso del valore) e sensori IoT si traduce in un immediato ritorno non solo in termini di produttività, ma anche di sostenibilità ambientale. La Lean si fonda sulla creazione di un flusso continuo "tirato" (Pull) dalle reali esigenze del cliente, abbandonando le logiche di produzione di massa "Push" che generano dannose sovrapproduzioni e accumuli di scorte. Nel rigido settore alimentare, ad esempio, l'integrazione dell'IoT supportata da simulazioni virtuali (Plant Simulation) ha permesso di abbattere i colli di bottiglia, portando a un aumento dell'efficienza complessiva della linea (OEE) oltre il 70%, con un incremento netto della produttività oraria del 7.8% e una compressione dei tempi di ciclo a parità di risorse impiegate(Pitjamit et al., 2024). Ancor più incisivi sono i risultati ottenuti in un plant industriale destinato alla produzione di macchine per il movimento terra, dove l'implementazione combinata di un sistema E-Kanban (che digitalizza i cartellini fisici rendendo la gestione logistica totalmente paperless) e di sensori IoT di tracciamento ha permesso di abbattere il pesante "Muda" delle macchine da 95 a soli 55 minuti in appena dieci giorni lavorativi (Tripathi & Bhadauria, 2026). In un'ottica avanzata di ottimizzazione energetica, spesso definita in letteratura come "integrazione Lean-Green", l'abbattimento sistematico dei tempi non a valore aggiunto ha generato un taglio netto dei consumi elettrici inefficaci pari al 38%, confermando come la riduzione degli sprechi temporali si traduca matematicamente in una riduzione dell'impronta ecologica e dei costi operativi dell'azienda (Tripathi & Bhadauria, 2026).

Tabella di Sintesi – Impatto dell'integrazione IoT ed Efficienza Operativa

Autore e Anno	Tecnologia Analizzata	Obiettivo di Efficienza	Impatto Sostenibilità	Focus Lean (Muda)	Note Critiche
Wu et al., 2023	Industrial IoT e Algoritmi ML	Riduzione idle time e tempi logistici (-91,8%)	Ottimizzazione uso macchinari	Attese / Trasporti	Necessità di forte pulizia dei dati grezzi
Mesarosova et al., 2024	Digital Shop Floor Management	Riduzione tempi raccolta dati manuale	Dematerializzazione carta	Processamenti / Movimenti	Rischio aumento tempi al PC per i Team Leader
Pitjamit et al., 2024	Sensori IoT e Plant Simulation	Aumento produttività (+7,8%) e OEE	Ottimizzazione risorse linea	Processi non a valore	Analisi fortemente dipendente dal VSM iniziale
Rahardjo et al., 2023	Digital Poka-Yoke e Six Sigma	Incremento resa produttiva al 100%	Riduzione sprechi di materiale	Difetti (Scarti)	Necessita rigido protocollo DMAIC a monte
Tripathi & Bhadauria, 2026	E-Kanban e Tracciamento IoT	Riduzione attesa macchina da 95 a 55 min	Riduzione consumi energetici (-38%)	Attese / Sovrapproduzione	N/A

Ora spostiamo l'attenzione sull'ottimizzazione dell'intralogistica e sulla sincronizzazione dei flussi di materiale, due ambiti in cui l'Industria 4.0 fornisce strumenti di simulazione e automazione in grado di elevare alla massima potenza i paradigmi del Just-in-Time (JIT) e dello Zero-Inventory. Storicamente, la movimentazione dei materiali, le attese e lo stoccaggio nei magazzini intermedi rappresentano alcune delle forme di spreco più difficili da sradicare all'interno dei plant manifatturieri, in quanto non aggiungono alcun valore diretto al prodotto finale ma sono necessari per sopperire alle variabilità del processo. L'evidenza empirica dimostra come la transizione verso la "Lean 4.0" affronti questo problema disaccoppiando l'ingegnerizzazione dal collaudo fisico, permettendo di testare e validare i flussi logistici in ambienti virtuali prima della loro effettiva messa in opera. In questo contesto, l'utilizzo della Value Stream Mapping abbinata a software di simulazione ad eventi discreti ha generato risultati tangibili in impianti produttivi complessi. In uno stabilimento per la fabbricazione di tubazioni industriali, ad esempio, la trasposizione della mappatura del flusso del valore all'interno di un ambiente di simulazione ha consentito di testare l'implementazione di un sistema integrato Lean-Digitale; i risultati hanno validato un crollo del tempo di attraversamento (lead time) del 44.70% e una riduzione dei tempi non a valore aggiunto del 45.25%, permettendo di ricalibrare il ritmo produttivo su un takt time effettivo di 763 secondi per rocchetto (Ijaz et al., 2023).

L'evoluzione della simulazione statica si concretizza nell'adozione del Digital Twin (Gemello digitale), un paradigma tecnologico che si è rivelato fondamentale per la gestione della personalizzazione di massa in linea di montaggio, nota come Modified-to-Order (MTO). Uno studio condotto presso un leader nella produzione di veicoli commerciali ha dimostrato come la progettazione virtuale tramite CAD e modelli ad elementi finiti (FEA), unita alla simulazione del gemello digitale, permetta di spostare le attività di customizzazione del veicolo direttamente sulla linea di assemblaggio principale, eliminando la necessità di officine di modifica dedicate e dei relativi trasporti logistici (Mota & Lins, 2025). L'approccio supportato dal Digital Twin e dal monitoraggio in tempo reale ha abbattuto i tempi di lavorazione per le modifiche fino all'80%, riducendo, in un caso specifico, l'assorbimento orario da 1120 minuti a soli 310 minuti, mantenendo contestualmente un tasso di non conformità irrisorio pari allo 0.1% (Mota & Lins, 2025).

Dal piano virtuale a quello fisico, la sincronizzazione intralogistica trova la sua massima espressione nell'introduzione dei Robot Mobili Autonomi (AMR) per l'approvvigionamento dei materiali a bordo linea. La dottrina snella richiede un flusso continuo e l'impiego del sistema Kanban per richiamare i componenti solo quando strettamente necessari. L'impiego degli AMR esalta questa logica, tuttavia la loro introduzione richiede un rigido calcolo ingegneristico per evitare il rischio di sotto saturazione della flotta o, al contrario, la congestione delle vie di transito. Un caso studio nel settore della rigenerazione di componenti automotive (remanufacturing) ha impiegato la simulazione 3D (software

Tecnomatix Plant Simulation) alimentata dai dati del sistema MES aziendale per determinare il dimensionamento ottimale del parco robot in affiancamento a logiche Kaizen e 5S (Pizoń et al., 2024). L'analisi delle varianti ha rivelato che l'impiego di un singolo AMR garantisce un eccellente bilanciamento (50.80% di tempo di lavoro e 49.19% di tempo di attesa), mentre l'introduzione di tre unità porta a un crollo dell'efficienza della flotta, con tempi di inattività che sfiorano l'82.18%, evidenziando come l'automazione intralogistica debba essere rigorosamente calibrata sui reali volumi della trazione Pull per evitare l'insorgenza di nuovi colli di bottiglia o investimenti di capitale sproporzionati (Pizoń et al., 2024).

Quindi, la stabilità e l'affidabilità dei flussi logistici complessi sono state indagate attraverso l'ausilio di modelli matematici avanzati volti a prevenire l'interruzione di alimentazione (cosiddetto starvation) verso i macchinari critici. La letteratura tecnica propone metodologie stocastiche, come il calcolo del valore di sopravvivenza (k -th survival value), per valutare la resilienza delle catene di relazioni logistiche in presenza di guasti e imprevisti (valutati tramite indici MTTF e MTTR). Applicato a sistemi ad altissimo consumo energetico, come forni di verniciatura e linee di tempra del vetro, tale algoritmo probabilistico (basato su distribuzioni Gamma o di Erlang) permette di prevedere matematicamente il rischio di interruzione del flusso materiale, consentendo un dimensionamento scientifico dei buffer inter-operazionali volto a scongiurare fermi macchina catastrofici (Zwolińska & Wiercioch, 2023). La ricerca dell'efficienza assoluta si estende anche all'integrazione di queste logiche con l'ottimizzazione degli ordini; l'applicazione di modelli di programmazione lineare mista intera (MILP) per la "posticipazione degli ordini" ha dimostrato di poter sincronizzare le operazioni multistadio abbattendo contestualmente i costi di anticipo e di ritardo delle consegne, spingendo la manifattura verso il traguardo teorico dello "Zero Warehousing" (Li et al., 2025). A supporto della solidità dei dati logistici, inoltre, si registra l'emergere di soluzioni basate su tecnologia Blockchain applicata all'E-Kanban, le quali, come simulato in contesti di iniezione plastica automotive tramite software Arena, garantiscono l'incorruttibilità del dato e una riduzione drastica dei ritardi di processamento delle informazioni lungo l'intera catena del valore (Ibrahim et al., 2025).

Tabella di Sintesi – Impatto di Simulazione, Digital Twin e Robotica sulla Logistica

Autore e Anno	Tecnologia Analizzata	Obiettivo di Efficienza	Impatto Sostenibilità	Focus Lean (Muda)	Note Critiche
Li et al., 2025	Modelli Matematici (MILP)	Sincronizzazione multi-stadio ("Zero-Warehousing")	Riduzione scorte e inefficienze spaziali	Scorte / Trasporti	Elevata complessità matematica per l'applicazione reale
Pizoń et al., 2024	AMR e Simulazione 3D	Ottimizzazione intralogistica e calcolo flotta (Lavoro 50,8%)	Meno usura mezzi, layout ottimizzato	Movimentazioni / Trasporti	Rischio rapida sottosaturazione aggiungendo robot
Ibrahim et al., 2025	Blockchain ed E-Kanban	Abbattimento ritardi elaborazione ordini	Riduzione sprechi documentali/cartacei	Processamenti (Data latency)	Focus simulato (Arena), barriere all'ingresso tecnologiche
Zwolińska & Wiercioch, 2023	Algoritmi Stocastici (K-th survival)	Prevenzione fermi su macchine energivore	Evitare sprechi di energia nei forni in idle	Attese (Starvation)	Valido solo con serie storiche robuste (MTTR/MTTF)
Ijaz et al., 2023	VSM e Software di Simulazione	Riduzione lead time (-44,7%) e NVAT (-45,2%)	Ottimizzazione ciclo di vita (LCA)	Attese / Scorte	Fortemente dipendente dall'accuratezza della VSM
Mota & Lins, 2025	Digital Twin e progettazione CAD/FEA	Personalizzazione in linea (-80% tempi di customizzazione)	Efficienza energetica eliminando reparti extra	Movimentazioni / Trasporti	

Successivamente, oltre all’infrastruttura puramente tecnologica, un elemento cardine del paradigma 4.0 riguarda l’evoluzione del capitale umano, vedendo la transizione verso la Lean 4.0 come una riprogettazione di un vero e proprio sistema sociotecnico integrato. La letteratura ingegneristica concorda sul fatto che l’introduzione di macchinari autonomi ed ecosistemi cyberfisici non miri a sostituire l’operatore, bensì a trasformare radicalmente le mansioni attraverso dinamiche precise di Job Enlargement (allargamento delle mansioni) e Job Enrichment (arricchimento del lavoro). Un rigoroso studio basato sul metodo Delphi, condotto su un panel di esperti internazionali, evidenzia come l’automazione dei compiti fisici e ripetitivi liberi i lavoratori, spingendoli verso ruoli a maggiore densità cognitiva che richiedono abilità di problem-solving e di personalizzazione intrinsecamente meno suscettibili all’automazione informatica. Tuttavia, la critica accademica sollevata da questo studio evidenzia un paradosso insidioso nella riprogettazione del lavoro: se da un lato i sistemi digitali guidano l’operatore aumentando l’efficienza, dall’altro vi è il rischio concreto di generare un nuovo “effetto catena di montaggio” di natura cognitiva (definito in letteratura come “Chaplin effect”), in cui il lavoratore perde la capacità di risolvere i problemi in modo creativo e innovativo a causa di una tecnologia eccessivamente prescrittiva e opaca (Cimini et al., 2024).

Per governare questa transizione e scongiurare il rischio di generare un dannoso “spreco digitale” derivante da tecnologie sottoutilizzate, le organizzazioni sono chiamate ad affrontare un massiccio piano di Upskilling (innalzamento delle competenze) e Reskilling (riqualificazione), volto a colmare il cosiddetto middle-skill gap, ovvero la profonda carenza di competenze intermedie che affligge le moderne manifatture (Colombari & Neirotti, 2024). Le indagini condotte sulle piccole e medie imprese, come dimostrato da uno studio su vasta scala tra le PMI europee e spagnole, rivelano un

dato per certi versi controintuitivo: il successo dell'integrazione Lean-Digitale richiede un intervento sullo sviluppo di soft skills (competenze trasversali) nettamente superiore rispetto a quello sulle competenze puramente tecniche o informatiche. Predisposizione mentale, flessibilità, comunicazione costante e apertura al cambiamento risultano essere leve insostituibili per superare l'inerzia organizzativa e la naturale resistenza degli operatori di fronte ai nuovi paradigmi operativi (Guerrero et al., 2025). L'assenza di tali pratiche "soft" (note come Lean Soft Practices), come il coinvolgimento continuo degli stakeholder e la formazione costante, depotenzia inevitabilmente l'efficacia degli strumenti digitali, rendendo gli investimenti in Industria 4.0 di fatto sterili e incapaci di generare ritorni concreti (Mezher et al., 2025).

Questa urgenza formativa si manifesta in modo critico nelle figure di raccordo dell'officina, come i Team Leader e i Supervisor di produzione, i quali si trovano ad operare al centro del nuovo paradigma del Data-Driven Decision-Making (DDM) a livello operativo. La digitalizzazione sposta inequivocabilmente il baricentro decisionale verso le prime linee produttive, decentralizzando il controllo. Tuttavia, l'efficacia di questo decentramento è strettamente vincolata alla capacità dei manager intermedi di estrarre e interpretare l'immensa mole di dati generata in tempo reale dai sensori IoT. Ricerche empiriche e quantitative basate su modelli di regressione, condotte nel settore della componentistica automotive italiana, hanno dimostrato che l'assenza di un adeguato upskilling analitico per i Team Leader rischia di vanificare pesantemente le sofisticate architetture 4.0. Senza un "occhio clinico" capace di combinare i dati numerici astratti con l'esperienza pratica e la conoscenza tacita (processo di sensemaking) degli operatori, i sistemi rischiano di essere alimentati da dati errati, non aggiornati o forniti con scarsa responsabilità dai lavoratori di linea. Diventa quindi vitale sviluppare routine sociotecniche in cui la tecnologia fornisce l'informazione elaborata, ma il lavoratore, dotato di nuove competenze decisionali e di un'adeguata autonomia, ne contestualizza la veridicità all'interno del proprio perimetro lavorativo per trasformare i "Big Data" in reale e azionabile conoscenza operativa (Colombari & Neirotti, 2024).

La sinergia tra fattore umano e sensori digitali trova la sua massima espressione nell'accelerazione delle storiche routine di miglioramento continuo, racchiuse nel concetto di Kaizen. La dottrina Lean stabilisce che ogni processo di Problem Solving debba seguire il rigido approccio scientifico del ciclo PDCA ideato da Deming. Negli stabilimenti in cui il paradigma 4.0 è stato pienamente integrato, la raccolta manuale dei dati (fase Plan) e la verifica dei risultati (fase Check) vengono automatizzate dai sistemi MES e IoT, abbattendo i tempi morti e riducendo l'errore umano nella compilazione della reportistica. Di conseguenza, i team leader possono concentrare l'intero sforzo cognitivo della squadra sull'analisi delle cause radice tramite strumenti visivi come il diagramma di Ishikawa (liscia di pesce) o la tecnica investigativa dei "5 Perché" (5 Whys), alimentati non più da stime empiriche

ma da serie storiche oggettive e inconfutabili (9.-*QUALITA' E MIGLIORAMENTO CONTINUO*, n.d.).

Questa oggettività data-driven si riflette infine sul consolidamento degli standard operativi, pilastro fondamentale per evitare la regressione dei processi. Metodologie snelle di organizzazione della postazione di lavoro come le 5S richiedono una disciplina rigorosa per essere mantenute nel tempo. L'analisi della letteratura dimostra come la digitalizzazione supporti attivamente le fasi più critiche di questo metodo, ovvero la standardizzazione e il rispetto delle regole: l'utilizzo di check-list digitali su tablet, la proiezione di istruzioni operative in realtà aumentata e l'uso di terminali touch-screen per la rendicontazione visiva delle anomalie rendono la deviazione dallo standard immediatamente evidente a tutto il team di reparto. In questo senso, la tecnologia non altera i principi del Visual Management previsti dalla Lean, ma li amplifica, garantendo che le prassi ottimali individuate dalla base operativa diventino patrimonio inattaccabile e replicabile dell'intera azienda (Carbonaro, 2014).

Questa profonda convergenza tra l'intuito umano e la precisione digitale ridefinisce infine le storiche pratiche Lean di risoluzione dei problemi, racchiuse nei principi di Kaizen (miglioramento continuo), Hansei (riflessione critica) e, in particolare, del Genchi Genbutsu (prescrizione manageriale di recarsi fisicamente sul luogo reale per osservare il processo) (Chen et al., 2025). Nonostante la diffusione di avanzati strumenti di intelligenza artificiale, reti di sensori e gemelli digitali capaci di effettuare analisi predittive e segnalare derive qualitative prim'ancora che il difetto si manifesti, la dottrina ingegneristica avverte che l'automazione non deve in alcun modo assumere il controllo totale e opaco dei processi a discapito della trasparenza del flusso decisionale. I sensori, per quanto estremamente avanzati, non possiedono la capacità di registrare e comprendere appieno tutte le complesse variabili umane e le dinamiche socio-organizzative presenti in un reparto produttivo. Pertanto, in un ecosistema Lean 4.0 maturo, come osservato analizzando sia gli stabilimenti all'avanguardia di Taiwan sia le catene del valore delle nazioni europee del blocco Visegrad, il Genchi Genbutsu non viene affatto superato dall'algoritmo, ma si evolve in un approccio spiccatamente ibrido. I dati estratti dal cloud o dai sistemi predittivi forniscono un orientamento oggettivo e istantaneo per individuare l'anomalia, ma i leader aziendali e i progettisti devono continuare a trascorrere un'ampia porzione del loro tempo sul Gemba (campo produttivo). Questa presenza fisica risulta insopprimibile per validare empiricamente le informazioni fornite dai software, discutere le cause radice (Root Cause Analysis) direttamente con la squadra operativa e garantire che il ciclo di miglioramento rimanga un processo saldamente guidato dalla sensibilità umana e supportato, ma non alienato, dall'infrastruttura tecnologica (Kliestik et al., 2023).

Tabella di Sintesi – Il Capitale Umano: Upskilling, Reskilling e Problem Solving 4.0

Autore e Anno	Tecnologia / Pratica Analizzata	Obiettivo di Efficienza	Impatto Sostenibilità	Focus Lean (Muda)	Note Critiche
(Guerrero et al., 2025)	Competenze I4.0 (Survey su PMI Spagnole)	Sviluppo skill per la transizione digitale	Sostenibilità sociale e organizzativa	Intellettuale (Talent inesperto)	L'indagine rivela che le <i>soft skill</i> sono richieste in misura maggiore rispetto alle pure competenze IT
(Kliestik et al., 2023)	Genchi Genbutsu ibrido e AI Predittiva	Trasparenza totale nei flussi di valore (GVC)	Ottimizzazione risorse tramite digital readiness	Attese / Difetti	Conferma che il dato predittivo dell'algoritmo non può eliminare l'osservazione fisica sul campo
(Mezher et al., 2025)	Modelli Architetturello Socio-Tecnici	Riduzione curva di apprendimento	Benessere operatore (Socio-Technical System)	Processamenti inutili	Il rischio di "digital waste" è altissimo in assenza di forte formazione (Lean Soft Practices)
(Colombari & Neirotti, 2024)	Data-Driven Decision-Making (Modelli di Regressione)	Risoluzione del <i>Middle-Skills gap</i> per i Team Leader	Coinvolgimento operatori nel <i>sensemaking</i>	Latenza decisionale	Studio empirico: se il Team Leader non ha skill analitiche, l'architettura IT si alimenta di "fake data"
(Cimini et al., 2024)	Job Enlargement & Enrichment (Metodo Delphi)	Aumento flessibilità e mansioni a densità cognitiva	Ergonomia cognitiva contro l'alienazione 4.0	Movimenti / Intellettuale	Solleva il rischio dell' <i>effetto Chaplin</i> se il lavoratore è eccessivamente guidato dalla macchina
(Chen et al., 2025)	Problem Solving (Kaizen/ Hansei in stabilimenti Top)	Sinergia totale per certificazioni ESG	Rispetto rigoroso degli standard GRI (Triple Bottom Line)	Sprechi sistemici	Focus multi-caso: la leadership umana si dimostra più decisiva del puro investimento in sensori

Infine, estendendo la prospettiva oltre i confini delle grandi multinazionali, emergono sfide specifiche affrontate dalle Piccole e Medie Imprese (PMI) e l'impatto olistico che la trasformazione digitale esercita sui paradigmi della sostenibilità, declinati secondo i criteri ambientali, sociali e di governance (ESG). A differenza delle grandi corporazioni, le PMI si scontrano con barriere intrinseche quali la scarsità di capitali, l'assenza di competenze specialistiche e la rigidità organizzativa. Analizzando il fenomeno attraverso la lente teorica delle "Dynamic Capabilities" (Capacità Dinamiche), la letteratura dimostra come le PMI debbano sviluppare routine specifiche per "percepire, cogliere e trasformare" (sensing, seizing, transforming) le opportunità tecnologiche; uno studio qualitativo basato su interviste semi strutturate a esperti del settore rivela infatti che le PMI di successo superano l'inerzia iniziale affidandosi a impulsi tecnologici piccoli ma frequenti, piuttosto che a stravolgimenti radicali dell'infrastruttura (Komkowski et al., 2025). Questa necessità di un approccio su misura emerge prepotentemente da un'indagine su larga scala condotta sulle PMI manifatturiere spagnole. A differenza del trend globale e europeo, che suggerisce di consolidare la Lean Production prima di introdurre i concetti di Industria 4.0, il 36% delle imprese spagnole si trova costretto a implementare i due paradigmi in modo simultaneo per sopravvivere alle pressioni del mercato, spinte principalmente da una disperata ricerca di efficienza interna e ottimizzazione dei costi piuttosto che da logiche di espansione competitiva (Guerrero et al., 2025).

La complessità di questa transizione simultanea è stata documentata in maniera eccellente da uno studio longitudinale della durata di 4 anni condotto all'interno di una PMI cinese (una joint-venture legata al gruppo Toyota). I ricercatori, utilizzando un approccio di ricerca accademica partecipativa, hanno implementato un sistema di controllo Lean Digitale basato sul monitoraggio di ben 80 metriche e 35 obiettivi di officina (Zhang et al., 2025). L'analisi di questo caso studio svela un dettaglio

ingegneristico cruciale: l'introduzione della digitalizzazione in un ambiente snello genera un iniziale e fisiologico calo delle performance operative (dovuto alla curva di apprendimento e all'adattamento ai nuovi flussi informativi), seguito da una ripresa e da un miglioramento esponenziale del controllo di fabbrica (Zhang et al., 2025). Per evitare che le imprese minori incorrano nell'errore di "digitalizzazione degli sprechi" investendo capitali in software sovradimensionati, la letteratura ha sviluppato specifici modelli di Audit Lean 4.0. Un esempio di rilievo è il framework diagnostico testato su imprese manifatturiere artigianali, il quale articola la maturità aziendale in quattro stadi incrementali (Readiness, Start-up, In transition, Advanced); la somministrazione di tale Audit permette al management di mappare con un'elevata precisione le lacune nei processi e di introdurre i cosiddetti abilitatori digitali (IoT, Cloud, Big Data) solo dove strettamente necessari per l'eliminazione dei colli di bottiglia (Ávila-Gutiérrez et al., 2025). La centralità della prontezza digitale (Digital Readiness) non si limita alla singola officina, ma si estende alla capacità delle nazioni di inserirsi nelle Catene del Valore Globali (GVC). Un'analisi condotta sulle nazioni del blocco Visegrad (V4) evidenzia infatti come l'istruzione digitale della forza lavoro e gli investimenti in Ricerca e Sviluppo siano le uniche leve in grado di trasformare i tradizionali poli di assemblaggio a basso costo in ecosistemi cyber-fisici avanzati, innalzando il valore aggiunto e la produttività nazionale del 6-8% annuo (Kliestik et al., 2023).

L'efficienza operativa e la solidità organizzativa sin qui descritte hanno come obiettivo il raggiungimento della sostenibilità, intesa come la convergenza della Triple Bottom Line (impatto economico, ambientale e sociale). La letteratura dimostra in modo inequivocabile che l'adozione delle tecnologie 4.0 agisce da catalizzatore per le performance "Green". Un'indagine basata su modelli di equazioni strutturali (SEM), condotta sul mercato egiziano durante le severe interruzioni logistiche causate dalla pandemia di COVID-19, ha provato empiricamente il ruolo di mediazione vitale dell'Industria 4.0: l'uso del Cloud e dei Big Data ha permesso alle aziende di ottimizzare il sistema Lean "Pull" (produzione tirata dal cliente), garantendo l'efficienza nell'uso delle materie prime, abilitando il riciclo degli scarti e contenendo le emissioni di CO₂ nonostante la crisi globale (Barakat et al., 2023).

Questa transizione verso un ecosistema industriale ecologico e socialmente responsabile viene definitivamente certificata dall'analisi dei report di sostenibilità basati sui rigidi standard internazionali GRI (Global Reporting Iniziative). Uno studio multi-caso, condotto su due aziende taiwanesi pluripremiate nei settori alimentari e tessile, ha messo a confronto il livello di penetrazione della Lean 4.0 con i risultati ottenuti in ambito ESG (Environmental, Social and Governance) (Chen et al., 2025). L'analisi incrociata ha dimostrato in modo conclusivo che un'implementazione pervasiva delle architetture cyber-fisiche (CPS) e dei principi Lean si traduce in un'eccellenza

assoluta sotto il profilo ambientale, permettendo alle aziende di implementare logiche di economia circolare, abbattere drasticamente i consumi idrici ed energetici e ridurre le emissioni inquinanti (Chen et al., 2025). Tuttavia, la critica ingegneristica e manageriale estratta da questi casi studio restituisce un avvertimento cruciale per il futuro dell'industria: l'infrastruttura tecnologica, da sola, è inefficace se non supportata da una cultura aziendale solida. È l'impegno di lungo termine del Top Management e la dedizione verso un approccio etico e centrato sul fattore umano a trasformare le potenzialità della digitalizzazione in una crescita aziendale realmente sostenibile e inattaccabile (Chen et al., 2025).

Tabella di Sintesi – Impatto della Lean 4.0 sulle PMI e sulla Sostenibilità (ESG)

Autore e Anno	Tecnologia Analizzata	Obiettivo di Efficienza	Impatto Sostenibilità	Focus Lean (Muda)	Note Critiche
Barakat et al., 2023	Modelli predittivi e Cloud 4.0	Resilienza operativa in fase pandemica	Riduzione CO2 e incentivo al riciclo	Sovrapproduzione / Scorte	Testato empiricamente solo nel mercato emergente egiziano
Guerrero et al., 2025)	Integrazione mista I4.0 e Lean	Ottimizzazione costi e produttività per PMI	Sostenibilità economica d'impresa	Processi non a valore	Evidenzia il forte limite di fondi e supporto governativo
Kliestik et al., 2023	GVC, Cyber-Physical Systems	Sincronizzazione catene del valore (V4)	Sviluppo ecosistemi a zero emissioni	Trasporti / Attese	Efficacia vincolata al grado di "Digital Readiness" nazionale
Komkowski et al., 2025	Dynamic Capabilities	Risposta rapida ai mutamenti di mercato	Sostenibilità organizzativa (Sensing)	Intellettuale	Modello teorico basato unicamente su 16 interviste qualitative
Zhang et al., 2025	Piattaforme di controllo digitali	Gestione officina tramite 80 KPI	Riduzione dissipazione di risorse energetiche	Difetti / Attese	Richiede di tollerare un calo fisiologico iniziale delle prestazioni
Ávila-Gutiérrez et al., 2025	Lean 4.0 Audit Model	Valutazione maturità in 4 stadi	Allocazione mirata degli investimenti	Processamenti (Inutili)	Concepito per realtà artigianali, da validare su scala complessa
Chen et al., 2025	Smart Factory e Sistemi CPS	Ottimizzazione TBL (Triple Bottom Line)	Rispetto standard GRI e Criteri ESG	Sprechi di sistema	La leadership manageriale risulta più decisiva della tecnologia

Capitolo 4

Analisi bibliometrica e network delle parole chiave

Per rafforzare il rigore scientifico di questa indagine e dimostrare in modo oggettivo la rilevanza dell'integrazione tra logiche Lean e Industria 4.0, l'analisi qualitativa della letteratura presentata nei capitoli precedenti è stata affiancata da un'approfondita analisi bibliometrica quantitativa. Come già dimostrato nella letteratura dedicata alla mappatura dei domini di ricerca emergenti, l'impiego della bibliometria permette di superare i limiti legati alla semplice revisione narrativa, in quanto consente di visualizzare l'evoluzione temporale dei concetti, di quantificare il peso delle singole nazioni di sviluppo tecnologico e di mappare le connessioni semantiche tra i diversi filoni accademici. L'adozione di un approccio misto (qualitativo tramite PRISMA e quantitativo tramite reti bibliometriche) mostra una prospettiva in grado di validare con dati statistici l'effettiva convergenza tra il paradigma snello e la digitalizzazione.

Per la realizzazione di ciò, è stato estratto un dataset composto da 276 documenti direttamente dal database Scopus, utilizzando la stessa stringa di ricerca contenente i medesimi criteri utilizzati per la metodologia PRISMA, con l'intento di garantire una totale coerenza lungo l'intero elaborato. L'estrazione dei dati e delle Author Keywords è stata condotta attraverso l'uso del software Bibliometrix, eseguito tramite la sua interfaccia grafica Biblioshiny, che ha permesso di facilitare la mappatura scientifica completa.

Con l'obiettivo di restituire una vista completa dell'attuale panorama di ricerca, l'indagine è stata strutturata e divisa in tre specifici livelli. In primo luogo, verrà indagata la struttura sociale e geografica della ricerca attraverso l'accoppiamento bibliografico tra i Paesi, per comprendere quali nazioni stiano guidando la transizione verso la Lean 4.0. Successivamente, l'indagine si sposterà sulla struttura concettuale del dominio ingegneristico, esplorando la rete di co-occorrenza delle parole chiave per identificare i cluster tecnologici più rilevanti. Infine, l'ultima sezione sarà dedicata all'evoluzione tematica per andare a tracciare la traiettoria di sviluppo dei concetti nel corso del tempo e individuare i paradigmi emergenti destinati a costituire il futuro della manifattura intelligente.

4.1

Analisi geocentrica e accoppiamento bibliografico tra paesi

La prima fase dell'indagine bibliometrica si pone l'obiettivo di decodificare la complessa struttura sociale e geografica della ricerca accademica relativa all'integrazione tra Lean Management e Industria 4.0. Attraverso la generazione della rete di collaborazione transnazionale (Countries Collaboration Network o accoppiamento bibliografico), è possibile visualizzare non solo quali nazioni siano maggiormente produttive in termini di volumi assoluti di pubblicazioni, ma anche l'intensità e l'architettura delle partnership scientifiche internazionali. In questa mappatura algoritmica, la dimensione dei nodi sferici è direttamente proporzionale al numero di documenti prodotti da un singolo Paese, mentre lo spessore e la presenza delle linee di collegamento (definite in letteratura come Total Link Strenght) indicano la frequenza e la solidità delle collaborazioni tra ricercatori e istituti di nazioni diverse

Dall'osservazione della topologia della rete emergono immediatamente i poli trainanti della ricerca ingegneristica globale, delineando un panorama spiccatamente policentrico. I nodi dotati di maggiore magnitudo, che si posizionano su un medesimo livello di influenza e densità relazionale, corrispondono a Regno Unito, India, Brasile, Australia e, in quarta posizione assoluta, l'Italia. Questa specifica distribuzione geografica è di estremo interesse accademico poiché destruttura l'assunto tradizionale secondo cui i paradigmi della manifattura avanzata siano ad esclusivo appannaggio delle storiche potenze occidentali o delle nazioni fondatrici dei rispettivi concetti (il Giappone per la Lean Production e la Germania per l'Industria 4.0). Al contrario, si evince una spiccata propensione all'adozione e allo studio di queste tematiche da parte delle economie dei paesi emergenti (come India e Brasile) e dell'area oceanica, a dimostrazione di come la digitalizzazione dei processi snelli sia ormai un fattore imprescindibile per la competitività su scala globale. In questo gruppo di testa, il posizionamento dell'Italia al quarto posto mondiale conferma il forte dinamismo del tessuto accademico e industriale del Paese; l'Italia è infatti storicamente caratterizzata da una fitta rete di Piccole e Medie Imprese (PMI) fortemente interessate all'ottimizzazione dei processi operativi attraverso le nuove tecnologie, che necessitano di un costante supporto dalla ricerca applicata per superare i limiti strutturali e finanziari della transizione digitale.

Scendendo nel dettaglio delle interconnessioni, la mappa rivela dinamiche relazionali fortemente polarizzate che ricalcano i moderni flussi economici. Spicca in modo evidente la presenza di un asse strategico di altissima intensità, un vero e proprio "triangolo della conoscenza" che lega in modo indissolubile il Regno Unito, l'India e gli Emirati Arabi Uniti. Questa solida alleanza accademica e industriale riflette verosimilmente le odierne dinamiche di trasferimento tecnologico e i massicci

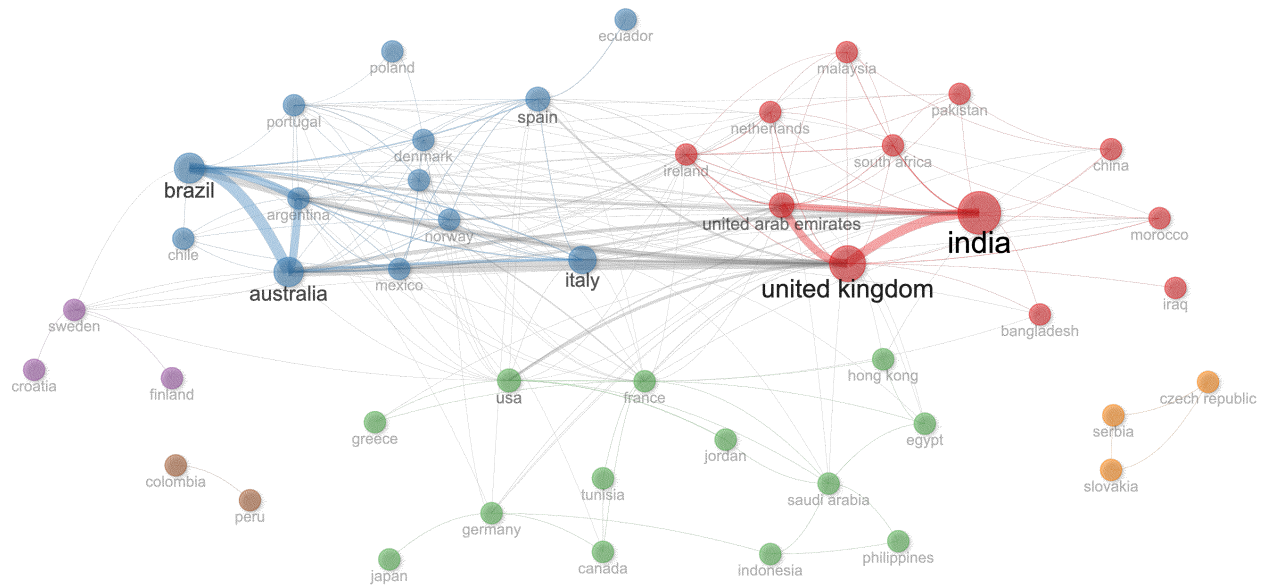
investimenti che fluiscono tra i centri di eccellenza anglosassoni, i nuovi hub manifatturieri asiatici e i poli logistici e finanziari mediorientali. Altrettanto significativa risulta la marcata connessione transoceanica individuata tra il Brasile e l'Australia, che testimonia la creazione di sinergie scientifiche tra economie distanti ma accomunate dalla necessità di modernizzare vasti apparati produttivi ed estrattivi. In questo network globale, l'Italia assume una posizione di rilievo fungendo da crocevia: collocandosi in una posizione centrale, il nodo italiano fa da ponte intercontinentale, risultando collegato principalmente con l'Australia e, tramite vettori relazionali più leggeri, con la vicina Spagna.

La vera profondità di questa analisi emerge tuttavia dall'osservazione dei sei macro-cluster tematici generati dall'algoritmo del software, identificati da diverse cromie, i quali svelano le reti di influenza e le affinità geopolitiche all'interno delle catene globali del valore (Global Value Chains). Il cluster più eterogeneo e ramificato, evidenziato in blu, ingloba nazioni di ben tre continenti diversi: troviamo i già citati nodi di Brasile, Australia e Italia, con un legame particolarmente intenso anche con l'Argentina, i quali fungono da attrattori per altri Paesi europei come Portogallo e Polonia, estendendo i propri legami fino al Sud America con Cile e Messico. Questo raggruppamento delinea un ecosistema sociotecnico in cui le metodologie di ottimizzazione vengono scambiate lungo assi linguistici e culturali affini. Il cluster rosso, invece, racchiude al suo interno la già citata alleanza anglo-asiatica guidata dal Regno Unito e India, mentre il cluster verde circoscrive in modo più conservativo le storiche potenze occidentali, essendo dominato dai solidi legami tra Stati Uniti e Francia, oltre ai vari legami e connessioni con altri Paesi europei, tra cui la Germania.

Di particolare rilevanza per la letteratura ingegneristica è l'isolamento del cluster arancione, all'interno del quale si osserva un fenomeno di forte autoriferimento relazionale: nazioni come Slovacchia, Serbia e Repubblica Ceca presentano legami quasi esclusivi tra di loro. Questa evidenza bibliometrica conferma pienamente le dinamiche di integrazione industriale documentate nei recenti studi riguardanti il blocco Visegrad (V4) e l'Est Europa. La letteratura dimostra infatti che tali nazioni tendono a formare un ecosistema manifatturiero altamente specializzato e interconnesso, storicamente trainato dagli investimenti diretti esteri nel settore automotive e nell'assemblaggio di precisione, in cui le pratiche Lean e l'automazione 4.0 vengono implementate in modo congiunto e standardizzato per fungere da forza motrice per l'intera filiera produttiva europea. Il loro isolamento nel network suggerisce che la loro ricerca sia fortemente focalizzata sulla risoluzione di problematiche operative interne al blocco stesso.

Infine, un ultimo elemento di rilievo è costituito dall'affacciarsi di nodi emergenti che mostrano un alto tasso di dinamismo nella produzione scientifica, quali Spagna, Irlanda e Sudafrica. Nel caso

specifico della Spagna, la sua crescita in questa rete riflette i massicci sforzi documentati in letteratura per diffondere i paradigmi della Lean 4.0 all'interno delle proprie PMI manifatturiere, spingendo verso un'adozione simultanea (e non sequenziale) di pratiche snelle e digitali per recuperare competitività internazionale. L'emergere dell'Irlanda riflette invece la sua trasformazione in hub tecnologico europeo, mentre la presenza del Sudafrica indica l'espansione dei modelli di efficienza operativa e sostenibilità 4.0 anche all'interno delle economie guida del continente africano.



4.2

Rete di co-occorrenza delle parole chiave (co-occurrence network analysis)

La seconda fase dell'indagine bibliometrica sposta il focus dall'analisi puramente geopolitica alla decodifica della complessa struttura concettuale e tecnologica del dominio di ricerca. Per comprendere le fondamenta teoriche su cui si regge l'integrazione tra le metodologie snelle e la digitalizzazione, è stata generata una mappa di co-occorrenza basata sulle Author Keywords (le parole chiave scelte dagli autori dei paper per categorizzare i propri studi). L'algoritmo di calcolo spaziale del software ha aggregato i termini in cinque macro-cluster tematici differenziati cromaticamente, posizionandoli sulla mappa in base alla forza dei loro legami semantici (Total Link Strenght). La topologia della rete, suddivisa tra un denso baricentro e un'articolata periferia, restituisce un quadro inequivocabile di come la letteratura ingegneristica stia affrontando la transizione verso la fabbrica intelligente, rendendo necessaria un'analisi dettagliata per ogni singolo raggruppamento.

Il cuore pulsante dell'intera mappa relazionale è dominato dal cluster rosso, che si posiziona esattamente al centro del grafico fungendo da centro di gravità per tutte le altre traiettorie di ricerca. All'interno di questo raggruppamento spiccano i due nodi di dimensioni massime in assoluto dell'intera analisi: "Industry 4.0" e "Lean manufacturing". La prossimità spaziale e l'elevato spessore delle linee di collegamento tra questi due termini certificano in modo definitivo l'assunto teorico del presente elaborato: la dottrina accademica e le pratiche industriali non considerano più i due modelli come percorsi alternativi o mutualmente esclusivi, ma come un singolo costruito sinergico. Tale convergenza è ulteriormente enfatizzata dai nodi "Digital Transformation" e "Lean 4.0". Un aspetto di straordinaria rilevanza strategica all'interno di questo cluster è la forte interconnessione con il termine "Sustainability" e, seppur con un focus leggermente decentrato, "Circular Economy". La letteratura moderna ha ampiamente dimostrato come l'eccellenza operativa sia lo strumento abilitante per il raggiungimento dei parametri ESG (Environmental, Social, Governance) e della cosiddetta strategia Triple Bottom Line (sostenibilità economica, sociale e ambientale). L'integrazione di sensori intelligenti e logiche pull minimizza i consumi energetici e ottimizza l'impiego di materie prime, rendendo la fabbrica non solo efficiente, ma ecologicamente resiliente. Sempre nella zona rossa emergono nodi primari definiti "isolati", tra cui "Smart factory" e "AHP" (Analytic Hierarchy Process). La posizione periferica di quest'ultimo non deve trarre in inganno: l'AHP è un potente strumento matematico di supporto alle decisioni multicriterio (Multi-Criteria Decision Making) utilizzato in letteratura per soppesare matematicamente le scelte di investimento tecnologico in ambienti incerti. La sua presenza dimostra che il passaggio alla fabbrica intelligente richiede modelli decisionali rigorosi per evitare investimenti in tecnologie non necessarie.

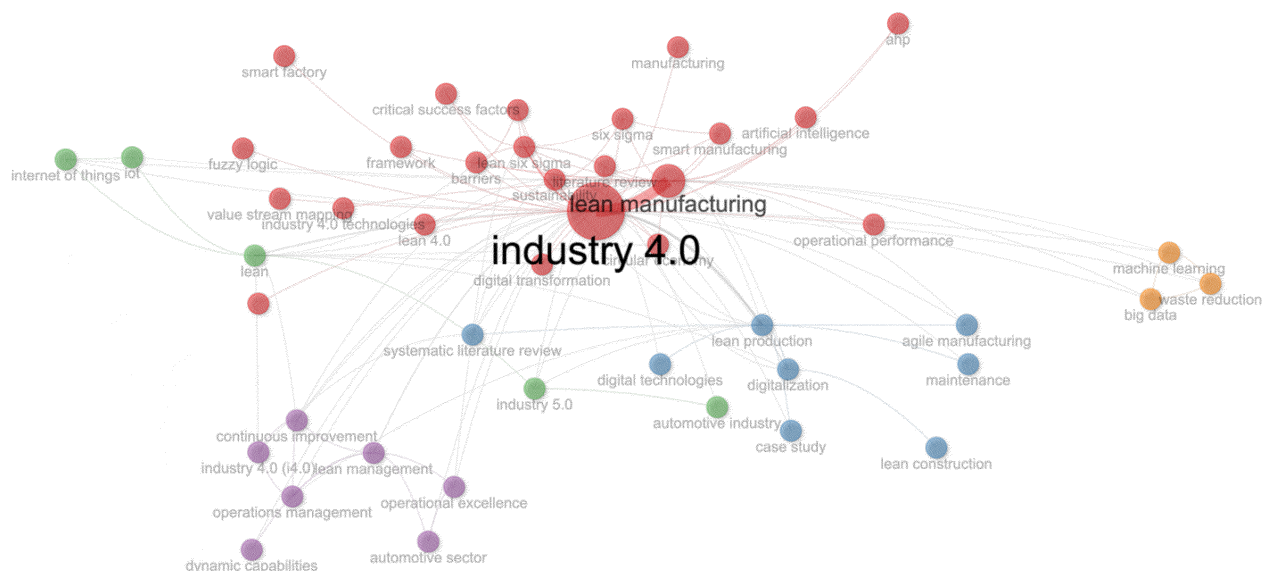
Analizzando le direttrici di confluenza verso il nucleo rosso, si osserva il cluster blu, il quale racchiude il fondamento metodologico su cui poggia l'intera transizione digitale. Questo gruppo aggrega nodi cruciali quali "Lean Production", "Digital technologies" e "Digitalization". La letteratura contemporanea chiarisce che la presenza di questi concetti in un blocco compatto sottolinea il ruolo propedeutico dei processi fisici rispetto alla loro conversione in bit. Le "Digital technologies" implementate su flussi di valore disorganizzati rischiano infatti di generare il paradosso della "digitalizzazione dello spreco" (digital waste). Un flusso Lean Production ben strutturato è il substrato obbligatorio per l'inserimento di interfacce Cyber-Physical Systems. In questo cluster è inoltre presente il nodo "Systematic literature review"; il suo emergere riflette il forte sforzo compiuto dai ricercatori negli ultimi anni per categorizzare, ordinare e sintetizzare l'enorme mole di casi di studio e teorie nascenti, al fine di fornire alle aziende delle linee guida operative standardizzate e scientificamente valide.

Spostandosi verso i lati del network, il cluster arancione si caratterizza per una natura squisitamente computazionale e predittiva. I nodi che lo compongono, seppure compatti e apparentemente isolati dalle ramificazioni più dense, convergono in modo diretto verso la “Lean Manufacturing” centrale tramite la presenza di tre concetti chiave: “Big Data”, “Machine Learning” e “Waste reduction”. Questo ponte diretto tra algoritmi complessi (arancione) e il sistema snello (rosso) svela il volto più pragmatico dell’Industria 4.0. Le tecnologie di calcolo avanzato e l’analisi dei Big Data non vengono impiegate come fini a sé stesse, ma fungono da microscopi digitali per tracciare e neutralizzare i Muda (sprechi) con una precisione irraggiungibile dalle tradizionali ispezioni visive o dai classici controlli statistici. Algoritmi di apprendimento automatico (Machine Learning) scansionano i parametri di temperatura, vibrazione e consumo delle macchine in tempo reale, anticipando i guasti tramite la manutenzione predittiva e riducendo parecchio i tempi di inattività (downtime). L’inclusione della “Waste reduction” in questo cluster algoritmico dimostra dunque che il contrasto alle inefficienze si è evoluto in una disciplina basata sui dati.

Il cluster viola, fortemente interconnesso al baricentro, introduce la dimensione manageriale e umana della ricerca, focalizzandosi su “Continuous improvement”, cioè il Kaizen, “Dynamic capabilities”, “Operation management” e “Operational excellence”. Il nodo del miglioramento è il vero motore della rete: mentre i sensori IoT forniscono i dati, sono le capacità cognitive del capitale umano (le risorse manageriali e gli operatori di linea) a dare un senso operativo a tali informazioni (sense making), trasformando le anomalie registrate in procedure standardizzate aggiornate. Estremamente rilevante dal punto di vista accademico è l’inclusione del termine “Dynamic capabilities” (capacità dinamiche). La teoria delle capacità dinamiche, fondamentale negli studi strategici, definisce l’abilità di un’azienda di integrare, costruire e riconfigurare rapidamente le proprie competenze interne ed esterne per rispondere ai mutamenti turbolenti dell’ambiente esterno. La sua presenza associata all’eccellenza operativa sancisce che un’implementazione Lean 4.0 di successo non richiede rigidità, ma un’elevata flessibilità organizzativa capace di assorbire l’innovazione tecnologica senza perdere il focus sul valore per il cliente.

Infine, il cluster verde ospita una combinazione di nodi di dimensioni ridotte ma dal peso strategico eccezionale, proiettando la mappa dal presente verso il futuro. Il termine “Automotive industry” rappresenta la culla storica dell’efficienza organizzativa; il settore automobilistico, che ha dato i natali al Toyota Production System decenni fa, continua a fungere da pioniere assoluto e laboratorio di prova anche per la quarta rivoluzione industriale, affrontando sfide uniche legate alla personalizzazione di massa e all’estrema complessità della distinta base. La forte connessione tra il settore automotive e i restanti nodi attesta come le pratiche validate in questo comparto fungano da riferimento (benchmark) per tutte le altre filiere manifatturiere. All’interno dello stesso cluster si colloca “Internet of Things”,

la spina dorsale sensoriale dell'automazione, che funge da tramite per la comunicazione inter-macchina. Il nodo con il ruolo di perno strutturale è la parola “Lean”: pur essendo piccola, si lega in modo trasversale al rosso, al blu e al viola. Ma il vero elemento dirompente del gruppo verde è la comparsa di “Industry 5.0”. Questo termine segna il passo oltre la pura digitalizzazione. La dottrina ha infatti iniziato ad allertare i progettisti circa i rischi di un'automazione alienante (spesso paragonata a un effetto Chaplin di natura cognitiva). Il paradigma emergente dell'Industria 5.0 sposta il focus da un approccio tecno-centrico a uno dichiaratamente human-centric (antropocentrico), prefigurando lo sviluppo di ecosistemi socio-tecnici in cui robot collaborativi (Cobot) e intelligenze artificiali non sostituiscono l'uomo, ma ne potenziano la creatività, l'ergonomia e le capacità decisionali.



4.3

Evoluzione temporale delle parole chiave: traiettorie e mutazioni di paradigma (thematic evolution)

L'ultima e fondamentale fase dell'indagine bibliometrica condotta tramite Biblioshiny è dedicata all'analisi dell'evoluzione tematica (Thematic Evolution). Se le reti di co-occorrenza analizzate in precedenza forniscono una fotografia statica delle interconnessioni semantiche, il diagramma alluvionale (o diagramma di Sankey) generato in questa fase introduce la variabile dinamica del

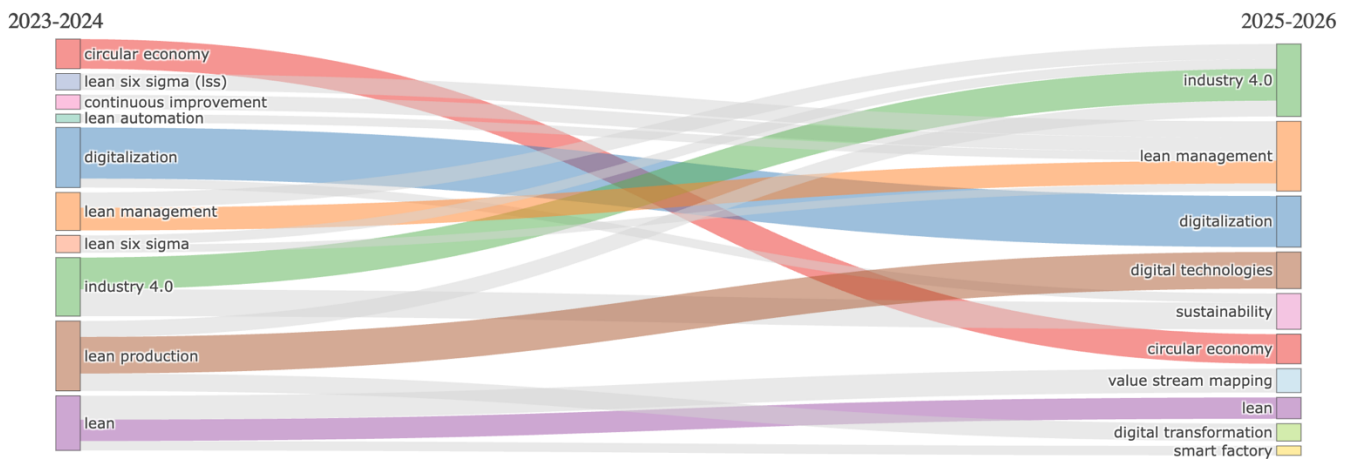
tempo, permettendo di osservare in modo inequivocabile la traiettoria di sviluppo, la mutazione e l'assorbimento dei concetti ingegneristici. L'algoritmo ha suddiviso l'orizzonte temporale recente in due periodi di osservazione strategici: un blocco di partenza a sinistra, relativo al biennio 2023-2024, e un blocco di arrivo a destra, proiettato sul biennio 2025-2026. L'analisi dei flussi di confluenza che collegano le terminologie passate ai paradigmi attuali e futuri ci mostra un panorama letterario in fortissima e rapida transizione, caratterizzato dalla scomparsa di alcuni termini storici a favore di nuovi costrutti più ibridi, a dimostrazione di una maturazione della dottrina della Lean 4.0.

Osservando l'architettura dei flussi generati nel biennio 2023-2024, il diagramma nella parte sinistra presenta una frammentazione di concetti specifici legati al mondo snello e della qualità, disposti gerarchicamente in nodi quali Circular Economy, Lean six sigma, Continuous improvement, Lean automation, Digitalization, Lean management, Lean six sigma, Industry 4.0, Lean production e Lean. La prima grande evidenza è data dal massiccio fenomeno di assorbimento che si verifica transitando verso il biennio 2025-2026. Termini operativi e metodologici storicamente dominanti nella letteratura, come Lean six sigma, Continuous improvement e Lean automation, subiscono una vera e propria sparizione visiva come entità e concetti indipendenti. Seguendo le traiettorie dei flussi, si nota come l'intera massa concettuale di questi termini venga inglobata dal macro-nodo del Lean management nella colonna di destra. Questo fenomeno non indica un declino dell'interesse accademico verso il Kaizen o verso l'automazione snella, ma una profonda maturazione organizzativa. La letteratura ha smesso di trattare questi elementi come "strumenti" isolati; infatti, ha cominciato a riconoscerli come componenti intrinseche di un sistema di gestione olistico, proprio il Lean management. Oggi, non è più concepibile parlare di management snello senza dare per scontata l'inclusione strutturale dei concetti del Six Sigma e dei cicli PDCA del miglioramento continuo.

Successivamente, procediamo con l'approfondimento sull'interscambio tra le metodologie tradizionali e le tecnologie abilitanti. Il diagramma mostra come una porzione sostanziale del flusso in uscita dal Lean Management del primo biennio, insieme a una quota derivante dal Lean six Sigma e a una piccola parte della Lean Production, vada a confluire direttamente nel grande nodo Industry 4.0, posizionato al vertice della colonna di destra. Questa intersezione rappresenta la prova visiva e quantitativa dell'affermazione del paradigma Lean 4.0. La quarta rivoluzione industriale ha smesso di essere considerata una pura infrastruttura informatica o ingegneristica, per diventare il "contenitore" naturale all'interno del quale le pratiche snelle trovano la loro massima espressione. I sistemi Cyber-fisici (CPS) e l'Internet of Things (IoT) necessitano delle logiche di riduzione degli sprechi per funzionare senza generare inefficienze digitalizzate, cioè digital waste, giustificando così il fatto che la letteratura sull'industria 4.0 oggi "assorba" i concetti della produzione snella per validare i propri modelli operativi.

Inoltre, possiamo individuare un'altra chiave di lettura dall'analisi del nodo Lean Production situato a sinistra. Nel suo tragitto verso il biennio successivo questo concetto storico subisce una vera e propria destrutturazione, dividendosi in tre flussi convergenti verso l'alto: una parte confluisce nel macro-nodo Industry 4.0, una seconda genera il nuovo nodo Digital Technologies, e una terza, equivalente a circa un terzo del volume originale, va ad alimentare il nuovo concetto della Digital Transformation. Contemporaneamente, il nodo sorgente Lean posizionato in basso a sinistra si divide per dare vita a tre specifici concetti a destra: Smart Factory. Lean e, soprattutto, Value Stream Mapping. Questa scomposizione evidenzia un passaggio importante: la fabbrica fisica sta subendo una mutazione ontologica; il "gemba" (luogo dove si crea il valore) non è più solo uno spazio fisico pieno di macchinari e operatori, ma diventa una smart factory governata dalle digital technologies. Il fatto che il termine "Value stream mapping" emerga autonomamente attesta inoltre il grande sforzo accademico profuso nello sviluppo del "VSM 4.0"; la tradizionale mappatura del flusso del valore con carta e penna sta lasciando il posto a mappature digitali in tempo reale alimentate da sensori RFID e tag intelligenti, capaci di ricalcolare autonomamente i Takt Time e i livelli di inventario.

Un altro aspetto molto rilevante e soprattutto innovativo dell'intero diagramma è l'emergere del nodo Sustainability nel biennio di destra, il quale non esisteva come entità indipendente nella prima colonna. L'analisi delle origini di questo nuovo nodo svela la direzione etica ed economica assunta dall'ingegneria moderna: Sustainability viene generata e alimentata da una porzione del flusso in uscita della Digitalization e, in modo importante, dal nodo Industry 4.0 di sinistra. Parallelamente, il flusso orizzontale della Circular Economy si mantiene invariato, affiancando il concetto di sostenibilità. Questi incroci dimostrano che l'implementazione delle tecnologie 4.0 (Big Data, Intelligenza Artificiale) ha superato l'obiettivo del vantaggio competitivo e della riduzione dei costi operativi. Oggi, la digitalizzazione e la transizione 4.0 vengono considerate come driver per il raggiungimento dei parametri ESG (Environmental, Social, Governance) e per l'abbattimento della carbon footprint. L'uso di sensori IoT per spegnere automaticamente i macchinari inattivi, o l'utilizzo di algoritmi predittivi per ottimizzare il consumo energetico e minimizzare gli sprechi di materiale, rappresentano la corretta evoluzione di un'efficienza che diventa ecologia. L'industria 4.0 cede dunque una parte del suo peso letterario alla sostenibilità, spalancando le porte alla nascente era dell'Industria 5.0, in cui la tutela dell'operatore, la forza aziendale e il rispetto per l'ecosistema globale diventeranno i nuovi standard del successo manifatturiero.



In sintesi, l’approccio multilivello adottato nell’analisi bibliometrica ha permesso di validare quantitativamente le ipotesi di ricerca emerse nella precedente revisione della letteratura. L’analisi congiunta dei dati derivanti dall’accoppiamento geografico, dalla rete di co-occorrenza e dall’evoluzione tematica restituisce il quadro di un panorama ingegneristico in forte espansione. Come evidenziato dalla mappatura, l’integrazione tra il Lean Management e le tecnologie dell’Industria 4.0 ha superato la fase di sovrapposizione teorica per raggiungere un paradigma organizzativo e sociotecnico strutturato, ormai consolidato in letteratura come “Lean 4.0”.

I grafici confermano che le tecnologie digitali operano come catalizzatori per le pratiche snelle, supportando le aziende non solo verso il raggiungimento dell’efficienza operativa e la riduzione degli sprechi, ma orientandole verso nuovi standard di sostenibilità ambientale e sociale. Questo percorso evolutivo, reso palese dai flussi di transizione che puntano verso la digitalizzazione sostenibile e il nascente paradigma dell’Industria 5.0, conferma come l’innesto delle tecnologie intelligenti su un’architettura Lean costituisca oggi il prerequisito fondamentale per garantire la competitività, l’adattabilità e la resilienza delle catene del valore nei complessi scenari manifatturieri moderni.

CAPITOLO 5

Framework applicativo della Lean 4.0: superamento della dicotomia tra efficienza tradizionale e innovazione digitale

La transizione verso i moderni scenari manifatturieri impone alle aziende di affrontare una sfida strategica: integrare i consolidati metodi di ottimizzazione organizzativa con le tecnologie abilitanti della Quarta Rivoluzione Industriale. In passato, la letteratura ha talvolta ipotizzato una potenziale tensione, o dicotomia, tra l'alta automazione digitale e il miglioramento continuo guidato dal fattore umano, tipico della Lean Production. Tuttavia, le evidenze accademiche più recenti dimostrano come l'Industria 4.0 e le metodologie snelle non rappresentino affatto paradigmi contrapposti, bensì dimensioni complementari e sinergiche, capaci di generare impatti significativi sulle prestazioni operative se adottate congiuntamente. Il superamento di questa dicotomia si realizza inquadrando la "Lean 4.0" come una vera e propria convergenza strutturale e come un sistema sociotecnico. All'interno di questo ecosistema, la tecnologia digitale non sostituisce la filosofia snella, ma si fonde in modo organico con le pratiche "soft" del Lean Management, fornendo dati in tempo reale e automazioni che supportano il processo decisionale umano. Per tradurre questa convergenza teorica in realtà operativa, la letteratura suggerisce l'adozione di un framework applicativo strutturato per fasi sequenziali, in cui capitale umano e automazione evolvono congiuntamente (Guerrero et al., 2025; Mezher et al., 2025).

5.1

Diagnosi e stabilità del processo: il ruolo della mappatura preventiva e della standardizzazione prima dell'adozione tecnologica

Il primo passaggio fondamentale per l'implementazione di un framework Lean 4.0 risiede nella diagnosi operativa e nella rigorosa standardizzazione del processo fisico prim'ancora di valutare qualsiasi opzione di digitalizzazione. La dottrina ingegneristica ha coniato il paradigma "Lean first, then Digitalize" per avvertire le aziende dei rischi legati a un'automazione non calibrata. Implementare infrastrutture Cyber-fisiche (CPS) o reti Internet of Things (IoT) all'interno di un flusso produttivo caotico e non standardizzato non conduce all'eccellenza, ma genera il paradosso del cosiddetto spreco digitale (digital waste), limitandosi di fatto a digitalizzare e velocizzare le inefficienze organizzative già esistenti.

Per scongiurare tale rischio, prima di introdurre tecnologie avanzate, l'organizzazione deve analizzare e razionalizzare i propri flussi operativi attraverso strumenti di diagnosi visiva e quantitativa, in primis la Value Stream Map (VSM). La mappatura del flusso del valore costituisce un'indagine analitica che rileva sia il flusso dei materiali fisici sia la stretta interdipendenza con il flusso delle informazioni che innescano la produzione. Il processo diagnostico si articola in due fasi essenziali. Inizialmente, il team manageriale deve elaborare la mappa dello stato attuale (Current State), osservando direttamente il processo per far emergere i Muda, termine che identifica gli sprechi. L'identificazione sistematica dei sette sprechi classici (sovrapproduzione, attese, trasporti inutili, processi inappropriati, scorte eccessive, movimenti non ergonomici e difetti) è essenziale per calcolare l'esatto rapporto tra le attività a valore aggiunto e il Lead Time totale di attraversamento del prodotto.

Completata questa diagnosi, la VSM richiede la progettazione di uno stato futuro idealmente privo di interruzioni e colli di bottiglia, all'interno del quale la produzione non è più spinta da previsioni stimate (approccio Push), ma "tirata" (approccio Pull) dalle reali richieste del mercato al ritmo del Takt Time, ovvero il tempo di ciclo calibrato sulle esigenze del cliente. È esattamente in questa fase di transizione tra lo stato attuale e lo stato futuro che si inserisce il corretto approccio all'Industria 4.0: l'integrazione di sensori IoT deve essere implementata nella mappa futura esclusivamente dove contribuisce in modo misurabile ad abbattere uno specifico spreco precedentemente rilevato.

Tuttavia, l'evidenza empirica dimostra che l'eliminazione teorica degli sprechi non è sufficiente se l'ambiente di lavoro fisico non viene parallelamente stabilizzato. L'affidabilità di una rete di sensori avanzati viene compromessa se i macchinari a cui è collegata risultano mal mantenuti o inseriti in un layout disorganizzato. Pertanto, la standardizzazione della postazione si pone come prerequisito organizzativo assoluto, resa possibile tramite l'applicazione del metodo 5S, analizzato in precedenza. La fase di ispezione consente di ripristinare le condizioni operative ottimali degli impianti. Solo un processo altamente standardizzato fornisce una base affidabile dalla quale partire con le tecnologie digitali ed eseguire i cicli iterativi PDCA fondamentali per il miglioramento continuo. In sintesi, la standardizzazione costituisce il substrato obbligatorio per garantire che l'automazione agisca come amplificatrice di un processo fisico già orientato alla qualità totale (9.-*QUALITA' E MIGLIORAMENTO CONTINUO*, n.d.; *Lean Production*, n.d.; Guerrero et al., 2025; Pitjamit et al., 2024; Pizoń et al., 2024).

5.2

Approccio alla sperimentazione: le modalità di validazione graduale delle soluzioni tecnologiche in ottica Lean

Una volta completata la diagnosi e raggiunta un'adeguata stabilità del processo fisico, il framework applicativo prevede l'integrazione effettiva delle tecnologie abilitanti. Il superamento della dicotomia tra approccio tradizionale e innovazione digitale si manifesta in questa fase attraverso il rifiuto dei rischiosi approcci di implementazione simultanea (cosiddetti "Big Bang"), tipici delle riorganizzazioni IT del passato. Al contrario, la letteratura prescrive un'adozione tecnologica fortemente incrementale, mutando l'approccio alla sperimentazione dal rigore metodologico del Lean Thinking. Tale logica si fonda sull'applicazione sistematica del ciclo iterativo PDCA teorizzato da W. Edwards Deming, che guida l'organizzazione attraverso le fasi di pianificazione, esecuzione, verifica e standardizzazione.

In questo ecosistema sociotecnico, l'introduzione di una nuova tecnologia non è concepita come un'implementazione top-down, bensì come un'ipotesi ingegneristica da validare sul campo. Per mitigare i rischi tecnici ed economici, l'implementazione si concretizza attraverso il lancio di progetti pilota interfunzionali circoscritti a specifiche aree critiche dello stabilimento. Ancor prima di intervenire fisicamente sul Gemba, l'Industria 4.0 mette a disposizione dell'ingegneria di processo strumenti predittivi ad alto potenziale, primo fra tutti il Digital Twin. La creazione di un Digital Twin consente di proiettare il mondo fisico in un ambiente virtuale ad alta fedeltà, permettendo ai progettisti di simulare l'introduzione di nuove macchine o testare l'efficacia di una rete IoT prima che la produzione venga fisicamente alterata. Questa validazione virtuale risponde pienamente al principio Lean di riduzione degli sprechi, in quanto evita di arrestare i sistemi reali per effettuare test sul campo, limitando le perdite di efficienza e scongiurando l'acquisto di hardware errato rispetto al reale Takt Time richiesto dal mercato.

Successivamente alla validazione virtuale, si passa alla sperimentazione fisica nell'area pilota. Questa fase richiede un forte presidio manageriale e un approccio ibrido, capace di unire l'agilità dello sviluppo informatico alla disciplina della produzione snella. I team interfunzionali, composti da esperti di operations, Information Technology e sostenibilità, collaborano per progettare le architetture dei dati e le interfacce. Questo approccio consente all'azienda di validare la tecnologia attraverso l'azione diretta, testando le soluzioni digitali su scala ridotta e misurandone l'impatto oggettivo sui parametri di processo.

La fase di verifica (Check) risulta quindi importantissima: la misurazione dei traguardi intermedi e la dimostrazione del ritorno sull'investimento in ogni singola fase del progetto pilota sono passaggi obbligati per mantenere il supporto attivo della leadership. Solo nel momento in cui la soluzione tecnologica dimostra empiricamente di aver ridotto un Muda o aumentato la flessibilità del processo in logica Pull, l'innovazione viene standardizzata (Act). Il nuovo standard tecnologico e procedurale costituisce a quel punto la base consolidata per procedere con il roll-out progressivo della soluzione sull'intero stabilimento, innescando un nuovo ciclo di miglioramento continuo (Della Comunicazione Aziendale & Nicotra, n.d.; *Industria 4.0 e Simulazione Di Impianti Industriali*, n.d.; *Understanding Lean Thinking and Practice Fundamentals*, n.d.; Mezher et al., 2025; Santos et al., 2025).

5.3

Gestione del capitale umano: l'evoluzione delle competenze e delle soft skills necessarie per la transizione

La transizione verso la manifattura intelligente sposta l'asse strategico dell'organizzazione aziendale, imponendo una ridefinizione del ruolo assegnato al lavoratore. Nei modelli industriali tradizionali, l'automazione avanzata veniva spesso considerata una minaccia diretta all'occupazione, generando una polarizzazione tra l'efficienza algoritmica e il fattore umano. Il framework Lean 4.0 supera tale tensione inquadrando l'operatore come il fulcro cognitivo di un sistema sociotecnico integrato. Poiché i sistemi automatizzati, la robotica collaborativa e le architetture IoT assorbono le mansioni puramente esecutive, ripetitive o usuranti, il lavoratore sperimenta dinamiche di job enlargement (allargamento delle mansioni) e job enrichment (arricchimento del ruolo). L'operatore transita così da funzioni solamente esecutive a compiti di controllo, supervisione e analisi ad alta densità cognitiva. In linea con la dottrina del Lean Management, l'efficienza complessiva non deriva dall'adozione di tecnologie isolate gestite da personale non qualificato, ma si fonda sull'ottenimento di prestazioni ottimali attraverso lo sviluppo delle risorse umane applicate a processi standardizzati.

Per supportare questa transizione di ruolo ed evitare l'obsolescenza professionale, è essenziale che le organizzazioni investano in modo strutturato nella formazione continua, definendo programmi di upskilling (aggiornamento delle competenze esistenti) e reskilling (riqualificazione verso nuove mansioni). Gli operatori di prima linea e i quadri intermedi devono acquisire le competenze tecniche (hard skills) necessarie per interagire con le interfacce uomo-macchina, monitorare i cruscotti digitali e interpretare le logiche basilari del controllo statistico di processo. La letteratura suggerisce che tale formazione non debba limitarsi ad aule teoriche separate dal contesto produttivo, ma debba fondarsi

sul principio del Learning By Doing, integrando l'istruzione formale con la pratica operativa quotidiana sul campo (Gemba).

D'altronde, l'evidenza accademica rileva come il fattore statistico di successo della trasformazione non risieda unicamente nell'alfabetizzazione digitale, ma nello sviluppo di soft skills avanzate. Il paradigma Lean 4.0 richiede flessibilità organizzativa, comunicazione interfunzionale e una spiccata attitudine al problem-solving. Le reti di sensori forniscono elevati volumi di dati sulle anomalie di processo, ma spetta alla capacità critica dell'operatore tradurre l'informazione in un'azione correttiva strutturata. A tal proposito, la filosofia del Kaizen insegna che l'ottimizzazione si persegue direttamente sul luogo in cui si genera il valore e che la condivisione delle competenze all'interno del team è superiore all'approccio individualistico. Questa valorizzazione del capitale umano si concretizza attraverso strumenti partecipativi quali i Circoli della Qualità o i cantieri Kaizen, i quali introducono un'evoluzione nella gestione delle risorse umane, conferendo ai gruppi di lavoro l'autonomia necessaria per indagare le cause radice delle inefficienze e definire nuovi standard operativi.

Infine, affinché questo ecosistema sociotecnico esprima appieno il proprio potenziale, è necessaria un'evoluzione nello stile di leadership. I modelli direzionali basati sulla gerarchia tradizionale di comando e controllo risultano incompatibili con la flessibilità richiesta dall'Industria 4.0. le aziende ad alte prestazioni necessitano di leader capaci di agire come facilitatori e formatori (definiti Sensei nella terminologia snella). Tali figure devono adottare un approccio volto a stimolare il ragionamento della squadra operativa attraverso domande mirate piuttosto che risposte preconfezionate, responsabilizzando i collaboratori e incentivando il lavoro in team. Un capitale umano integrato e formato non svilupperà fenomeni di resistenza culturale verso l'innovazione digitale, ma la accoglierà come un'amplificazione delle proprie capacità analitiche, garantendo la sostenibilità di lungo periodo del modello industriale (Carbonaro, 2014; Della Comunicazione Aziendale & Nicotra, n.d.; *Lean Production*, n.d.).

5.4

Il nuovo ruolo manageriale: il processo decisionale guidato dai dati e l'importanza del presidio diretto sul Gemba

La transizione verso l'industria 4.0 e l'implementazione di reti di sensori e sistemi Cyber-fisici dotano la direzione aziendale di un elevato volume di informazioni in tempo reale. Tale disponibilità informativa abilita un'evoluzione del paradigma organizzativo, consentendo il passaggio da scelte

direzionali basate prevalentemente sull'intuito o sull'esperienza empirica a un processo decisionale guidato dall'evidenza numerica, definito in letteratura come Data-Driven Decision Making (DDDM). L'acquisizione continua di parametri operativi trasferisce il focus manageriale dal controllo a posteriori alla prevenzione degli eventi critici. L'analisi dei Big Data permette infatti ai supervisori di anticipare le anomalie, riducendo l'incidenza dei fermi macchina e dei difetti di conformità. In questo contesto, le architetture informatiche favoriscono una decentralizzazione del processo decisionale, conferendo maggiore autonomia ai responsabili di linea nella filtrazione e interpretazione dei flussi di dati virtuali.

Tuttavia, nonostante l'ampia disponibilità di cruscotti digitali e interfacce di controllo remoto, la dottrina manageriale evidenzia il rischio di una gestione distaccata dalla realtà fisica dello stabilimento. Il framework Lean 4.0 previene tale deriva ribadendo la centralità del principio fondante del Kaizen: l'imperativo di recarsi di persona sul Gemba, ovvero il luogo esatto in cui si genera il valore produttivo. I sensori e i sistemi di Machine Learning, pur essendo avanzati e predittivi, si limitano a registrare l'anomalia numerica, ma non possiedono la capacità di catturare il contesto tacito, l'ergonomia della postazione e le molteplici variabili operative che solo l'osservazione diretta può rilevare. Guidare la produzione esclusivamente attraverso indicatori virtuali rischia di allontanare i centri decisionali dalle reali cause radice dei problemi.

Di conseguenza, il nuovo ruolo del manager 4.0 consiste nel fungere da interfaccia strategica tra l'analisi fornita dall'intelligenza artificiale e la conoscenza empirica degli operatori di prima linea. Le decisioni operative più efficaci derivano sempre dall'intersezione sistemica tra l'output quantitativo dell'algoritmo e l'indagine qualitativa condotta sul campo. Il management moderno utilizza l'evidenza numerica non come strumento di controllo, ma come base oggettiva per avviare l'indagine sul Gemba, valorizzando l'esperienza dei lavoratori per strutturare azioni correttive concretamente applicabili al contesto della fabbrica intelligente (*Industria 4.0 e Simulazione Di Impianti Industriali*, n.d.; *Lean Production*, n.d.).

5.5

Monitoraggio delle criticità: l'analisi dei potenziali rischi organizzativi e tecnici derivanti dall'automazione

L'integrazione sistemica che caratterizza il framework Lean 4.0, pur generando significativi benefici prestazionali, comporta l'insorgenza di nuove criticità che necessitano di un monitoraggio proattivo e costante. L'innesto di reti di sensori e algoritmi all'interno di un flusso fisico amplifica infatti la

vulnerabilità del sistema, qualora l'infrastruttura non venga adeguatamente presidiata. L'analisi della letteratura ingegneristica permette di classificare tali rischi in due macrocategorie interdipendenti: le criticità tecnico-infrastrutturali e socio-organizzative.

Sotto il profilo tecnico, l'iper-connettività che lega i macchinari di reparto, i sistemi gestionali ERP (Enterprise Resource Planning) e le interfacce Cloud espone l'architettura aziendale a vulnerabilità informatiche. La Cybersecurity diventa un requisito importante per garantire l'integrità dei dati operativi, la tutela del know-how e la protezione da intrusioni esterne. Inoltre, in un sistema snello governato dalla logica Pull e caratterizzato da scorte intermedie tendenti allo zero, l'avaria di un singolo macchinario automatizzato rischia di interrompere l'intero flusso del valore. Per mitigare tale rischio, la dottrina prescrive il superamento della tradizionale manutenzione a guasto (Breakdown Maintenance) in favore della Total Productive Maintenance (TPM) e della manutenzione predittiva (Condition-based), le quali mirano a prolungare la vita utile dell'impianto intercettando l'anomalia prima della rottura. A questo si affianca il principio del Jidoka (autonomazione): le macchine 4.0 devono essere dotate della capacità di interrompere autonomamente il ciclo produttivo qualora rilevino una difettosità, impedendo la propagazione dell'errore alle stazioni a valle.

Per quanto concerne la dimensione socio-organizzativa, la letteratura accademica individua le principali barriere nella gestione del cambiamento. Il fallimento dei progetti di digitalizzazione è spesso imputabile all'inerzia culturale del personale e alla mancanza di un supporto strutturato da parte dell'alta direzione (Top Management commitment). Il rischio organizzativo principale risiede nella regressione verso le inefficienze storiche: in assenza di un rigoroso presidio degli standard, gli operatori tendono ad aggirare i nuovi sistemi digitali. Si rende pertanto necessaria l'adozione di logiche di change management per valutare la prontezza culturale dell'azienda e guidare attivamente l'accettazione tecnologica.

Al manifestarsi di una criticità, il framework Lean 4.0 rifiuta approcci destrutturati, imponendo l'utilizzo di strumenti analitici per il Problem Solving. Per risalire alla causa radice di un malfunzionamento, i team ricorrono al Diagramma di Ishikawa (causa-effetto), il quale permette di mappare le variabili incidenti (macchine, manodopera, metodi, materiali, misurazioni). L'indagine viene successivamente approfondita tramite la tecnica iterativa dei "5 Perché". Data l'elevata mole di segnali di allarme generabili dalle architetture digitali, il monitoraggio delle inefficienze viene razionalizzato attraverso l'Analisi di Pareto: applicando la regola dell'80/20, il management focalizza le risorse su quel 20% di cause critiche che genera l'80% delle dispersioni di valore. Infine, l'azione correttiva si concretizza nella progettazione di soluzioni Poka-Yoke, ovvero interfacce digitali o accorgimenti meccanici che prevengono fisicamente o logicamente la reiterazione dell'errore (9.-

QUALITA' E MIGLIORAMENTO CONTINUO, n.d.; *Lean Production*, n.d.; Ávila-Gutiérrez et al., 2025; Carbonaro, 2014; Della Comunicazione Aziendale & Nicotra, n.d.).

5.6

Sostenibilità integrata: il legame tra efficienza operativa e raggiungimento degli obiettivi ESG

Uno degli esiti più rilevanti derivanti dal superamento della dicotomia tra approccio snello e innovazione digitale risiede nel suo impatto strutturale sulla sostenibilità aziendale. La letteratura ingegneristica e manageriale contemporanea non valuta più le performance d'impresa esclusivamente sotto il profilo del profitto economico di breve termine, bensì adotta il paradigma della Triple Bottom Line, misurando i risultati attraverso i parametri ESG (Environmental, Social, Governance). In tale scenario competitivo e normativo, il framework Lean 4.0 opera un cambio di paradigma: l'efficienza operativa evolve da semplice strumento di riduzione dei costi interni a leva strategica abilitante per la sostenibilità industriale.

Sotto il profilo ambientale, l'intersezione tra le pratiche Lean e l'Industria 4.0 consolida il paradigma definito in dottrina come "Lean-Green". La sistematica riduzione dei Muda possiede un'intrinseca valenza ecologica, in quanto l'eliminazione di sovrapproduzione, difettosità e trasporti non necessari si traduce in una contrazione diretta nel consumo di risorse. L'integrazione delle tecnologie digitali permette di elevare tale efficienza ai livelli richiesti dai moderni standard di sostenibilità. Le reti IoT e l'analisi dei Big Data abilitano il monitoraggio puntuale e in tempo reale dei consumi energetici, idrici e pneumatici per singola risorsa produttiva. Gli algoritmi di controllo ottimizzano i cicli termici e gestiscono lo stand-by intelligente dei macchinari, riducendo le dispersioni e la carbon footprint dello stabilimento. Inoltre, l'integrazione di metriche strutturate come il Life Cycle Assessment all'interno dei sistemi 4.0 garantisce la tracciabilità e la minimizzazione dell'impatto ecologico lungo l'intera catena del valore, supportando la transizione verso modelli di economia circolare. Infine, la digitalizzazione dei flussi informativi favorisce la completa dematerializzazione delle procedure documentali.

Per quanto concerne le dimensioni sociali e di governo societario, il framework integrato fornisce metriche di miglioramento altrettanto rilevanti. Sotto il profilo sociale, l'applicazione rigorosa di metodi visivi come le 5S genera un ambiente di lavoro più sicuro ed ergonomico, abbattendo i fattori di rischio sul Gemba. Parallelamente, l'allocazione delle mansioni usuranti o pericolose alla robotica collaborativa tutela l'integrità psicofisica degli operatori, in allineamento con i principi etici emergenti dell'Industria 5.0. Relativamente alla Governance aziendale, i sistemi cyber-fisici e i

registri distribuiti (come, ad esempio, la Blockchain applicata alla manifattura) assicurano la trasparenza e la tracciabilità oggettiva dei dati di produzione. L'integrità dell'informazione, non più soggetta ad alterazioni manuali, garantisce agli stakeholder e agli enti certificatori la compliance rispetto alle normative vigenti. In sintesi, l'evidenza accademica dimostra che la sinergia tra fabbrica snella e intelligente costituisce un modello organizzativo capace di rispondere alle pressioni normative contemporanee, allineando la redditività operativa con la responsabilità ecosistemica e la tutela del capitale umano (Ávila-Gutiérrez et al., 2025; Chen et al., 2025; Ibrahim et al., 2025; Ijaz et al., 2023; Lakshmanan et al., 2023; Pizoń et al., 2024; Santos et al., 2025).

5.7

Pianificazione degli investimenti: massimizzare il ROI attraverso l'agilità e il retrofitting

La transizione verso l'ecosistema Lean 4.0 solleva criticità rilevanti in merito alla sostenibilità finanziaria del processo, in particolare per le Piccole e Medie Imprese, spesso soggette a vincoli di capitale. L'approccio tradizionale all'innovazione tecnologica, basato sulla sostituzione radicale degli impianti (logica Big Bang), comporta un elevato assorbimento di liquidità e il rischio di prolungati fermi linea per i collaudi. Inoltre, un investimento non calibrato espone l'azienda al rischio di acquisire apparecchiature sovradimensionate rispetto al reale Takt Time richiesto dal mercato.

Per ovviare a tali ostacoli, il framework applicativo mutuato dal World Class Manufacturing (WCM) suggerisce l'impiego del Cost Deployment (Sviluppo dei costi). Questa metodologia analitica consente di mappare e quantificare matematicamente le perdite e gli sprechi più impattanti all'interno dello stabilimento, permettendo alla direzione di allocare il budget per la digitalizzazione esclusivamente nelle aree di processo in cui la tecnologia garantisce il massimo ritorno economico. La pianificazione degli investimenti si configura pertanto come un intervento mirato, contrapposto a logiche di rinnovamento generalizzate.

Il secondo asse strategico per abbattere le barriere all'entrata è l'adozione sistematica della pratica del retrofitting. L'evidenza empirica dimostra che l'ingresso nel paradigma 4.0 non richiede necessariamente la dismissione dei macchinari esistenti. Il processo di retrofitting si articola in una rigorosa analisi dello stato dell'arte (AS-IS Analysis) e nella definizione di obiettivi strategici circoscritti, seguiti dall'installazione progressiva di sensori IoT e interfacce di controllo a basso costo sull'equipaggiamento tradizionale. Questa soluzione tecnica permette di trasformare una macchina analogica in un nodo cyber-fisico integrato nel Cloud aziendale, abilitando l'analisi predittiva e la simulazione, riducendo drasticamente l'intensità del capitale investito iniziale.

L'obiettivo di tale pianificazione finanziaria modulare è garantire un rapido Ritorno sull'Investimento (ROI) a ogni singolo step di implementazione. I risparmi generati dalle prime efficienze (come la riduzione del digital waste) possono essere reinvestiti per autofinanziare le fasi successive della trasformazione tecnologica. Come evidenziato dai casi di studio relativi alla componentistica automotive analizzati in letteratura, l'adozione strutturata di tali strumenti manageriali consente di incrementare la flessibilità produttiva, riducendo il capitale impiegato e gli spazi fisici occupati. Un simile approccio dimostra che l'innovazione digitale, se guidata dai principi snelli, non rappresenta un onere finanziario insostenibile, ma un investimento strategico per il consolidamento del vantaggio competitivo (Ávila-Gutiérrez et al., 2025; Della Comunicazione Aziendale & Nicotra, n.d.; *Industria 4.0 e Simulazione Di Impianti Industriali*, n.d.).

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si è posto l'obiettivo di indagare l'evoluzione dei sistemi produttivi, tracciando il percorso che unisce la rigorosa disciplina del miglioramento continuo alle dirompenti potenzialità della digitalizzazione. L'obiettivo principale era capire se l'approccio snello potesse sopravvivere o dovesse invece soccombere di fronte all'automazione totale e all'analisi dei Big Data. Attraverso una revisione sistematica della letteratura, l'analisi bibliometrica e lo sviluppo di un framework applicativo, è emersa una risposta chiara: Lean e Industria 4.0 non rappresentano paradigmi contrapposti, bensì due dimensioni sinergiche e complementari che, se integrate, danno vita a un modello congiunto per la competitività industriale.

L'indagine ha dimostrato che l'implementazione tecnologica isolata è destinata al fallimento o a generare rendimenti marginali se non è preceduta da una profonda ottimizzazione dei flussi. Inserire sensori avanzati e intelligenza artificiale all'interno di un processo caotico, non preventivamente mappato né stabilizzato, conduce inevitabilmente alla "digitalizzazione degli sprechi", cioè "Digital Waste". Pertanto, il paradigma "Lean first, then Digitalize" si conferma come il caposaldo operativo: l'infrastruttura snella prepara il terreno eliminando le inefficienze di base, mentre le tecnologie 4.0 intervengono per abbattere i limiti fisiologici della Lean tradizionale, garantendo il tracciamento in tempo reale, la manutenzione predittiva e la simulazione tramite Digital Twin.

Inoltre, lo studio del framework applicativo ha ribadito la centralità assoluta del fattore umano e dell'architettura organizzativa, definendo la Lean 4.0 come un vero e proprio sistema sociotecnico. La digitalizzazione non svislaccia il ruolo dell'operatore, ma lo eleva attraverso dinamiche di job enrichment, trasferendolo da mansioni esecutive a ruoli di supervisione e problem-solving. Emerge dunque la necessità costante per le aziende di investire in programmi di upskilling e reskilling, al fine di colmare il divario di competenze e preparare la forza lavoro all'interazione con le interfacce cyber-fisiche. Allo stesso modo, il ruolo manageriale subisce una mutazione profonda: l'abbondanza di dati abilita un processo decisionale oggettivo (Data-Driven Decision Making), ma la letteratura avverte che la vera leadership Lean 4.0 richiede al manager di agire come un Sensei (maestro), il quale non governa l'impianto da un monitor remoto, bensì scende sul Gemba per unire l'evidenza numerica algoritmica al contesto tacito dei lavoratori di prima linea.

Infine, l'elaborato ha evidenziato come l'adozione di questo modello congiunto dovrebbe andare oltre la semplice riduzione dei costi di produzione, elevandosi a leva strategica fondamentale per il raggiungimento della sostenibilità globale secondo l'approccio del Triple Bottom Line e i criteri ESG. L'efficienza operativa si trasforma in efficienza ecologica (Lean-Green): l'abbattimento dei difetti, il

controllo dei consumi tramite IoT e la logistica ottimizzata si traducono in una drastica riduzione dell'impronta carbonica e del consumo di risorse primarie.

Nonostante le evidenti potenzialità, il percorso verso l'eccellenza digitale presenta ostacoli intrinseci, come ad esempio l'opposizione culturale, la carenza di capitali e i rischi di cybersecurity. Il superamento di tali barriere richiede l'adozione di roadmap incrementalmente basate sul ciclo di Deming (PDCA) e pratiche come il retrofitting sensoriale. In ottica futura, la ricerca accademica e la prassi manageriale sono chiamate a indagare l'integrazione dell'intelligenza artificiale e della robotica collaborativa avanzata, aprendo le porte al paradigma dell'Industria 5.0, in cui la resilienza aziendale, il benessere del lavoratore e l'ecosostenibilità diventeranno lo scopo finale della manifattura globale.

In conclusione, "Dal miglioramento continuo alla Digitalizzazione" non è solo il titolo di questo lavoro, ma la sintesi della sfida che attende l'industria moderna. Solo le organizzazioni capaci di fondere l'intelligenza analitica della macchina con il rigore metodologico e la creatività dell'essere umano potranno raggiungere la propria resilienza e prosperità nei complessi scenari competitivi del domani.

Bibliografia

9.-QUALITA' E MIGLIORAMENTO CONTINUO. (n.d.).

Ávila-Gutiérrez, M. J., Córdoba-Roldán, A., Morato-Huerta, P., & Lama-Ruiz, J. R. (2025). Modernizing Small and Medium-Sized Enterprises: A Lean Audit Model for Digital Integration. *Systems*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/systems13040304>

Barakat, M. R., Allah, A. E. A., Haddad, S. S. G., & Ali, A. H. (2023). A MULTI-MEDIATION MODEL ANALYSIS OF INDUSTRY 4.0, MANUFACTURING PROCESS FACTORS AND GREEN PERFORMANCE UNDER COVID-19. *Journal of Applied Structural Equation Modeling*, 7(1), 48–72. [https://doi.org/10.47263/JASEM.7\(1\)03](https://doi.org/10.47263/JASEM.7(1)03)

Bianco, D., Godinho Filho, M., Osiro, L., & Ganga, G. (2023). Unlocking the Relationship Between Lean Leadership Competencies and Industry 4.0 Leadership Competencies: An ISM/Fuzzy MICMAC Approach. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 70(6), 2268–2292. <https://doi.org/10.1109/TEM.2021.3069127>

Carbonaro, C. (2014). *Introduzione al Lean Management* Castellanza.

Chen, C., Pong, K. Y., & Chung, W. J. (2025). When Lean Meets Industry 4.0: A Case-Based Research for Exploring the Effects of Lean 4.0 on ESG and Sustainability Performance. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 72, 3023–3041. <https://doi.org/10.1109/TEM.2025.3582926>

Cimini, C., Lagorio, A., Romero, D., Gaiardelli, P., & Tortorella, G. L. (2024). On Job Profiles Enlargement and Enrichment when Lean and Industry 4.0 Paradigms Meet. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 15(4), 338–347. <https://doi.org/10.24867/IJIEEM-2024-4-367>

Colombari, R., & Neirotti, P. (2024). Leveraging Frontline Employees' Knowledge for Operational Data-Driven Decision-Making: A Multilevel Perspective. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 13840–13851. <https://doi.org/10.1109/TEM.2023.3291272>

della Comunicazione Aziendale, I. E., & Nicotra, S. (n.d.). *UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO SCUOLA DI AMMINISTRAZIONE AZIENDALE CORSO DI LAUREA INTERFACOLTÀ IN MANAGEMENT Dal Total Quality Management al Lean Thinking.*

Digital Manufacturing-escaping pilot purgatory. (n.d.).

- Guerrero, B., Mula, J., Poler, R., Hines, P., & Kumar, M. (2025). Adopting Lean Industry 4.0: insights from Spanish manufacturing SMEs in an international context. *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2606913>
- Ibrahim, R., Driss, S., & Ismail, L. (2025). How Blockchains Improve Lean Manufacturing Tools in the Industry 4.0 Context †. *Engineering Proceedings*, 97(1). <https://doi.org/10.3390/engproc2025097039>
- Ijaz, T., Ismail, M., Haider, S. M., Rafique, M. Z., & Jamshaid, S. H. (2023). Production Enhancement through Integration of Lean, Life Cycle Assessment & Industry 4.0. *Jurnal Kejuruteraan*, 35(3), 755–766. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2023-35\(3\)-23](https://doi.org/10.17576/jkukm-2023-35(3)-23)
- Industria 4.0 e simulazione di impianti industriali*. (n.d.).
- Industry 4.0 demystified-lean's next level*. (n.d.).
- industry-4-0-capturing-value-at-scale-in-discrete-manufacturing-vf*. (n.d.).
- Kliestik, T., Nagy, M., & Valaskova, K. (2023). Global Value Chains and Industry 4.0 in the Context of Lean Workplaces for Enhancing Company Performance and Its Comprehension via the Digital Readiness and Expertise of Workforce in the V4 Nations. *Mathematics*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/math11030601>
- Komkowski, T., Antony, J., Garza-Reyes, J. A., Tortorella, G. L., & Pongboonchai-Empl, T. (2025). Integrating Lean Management with Industry 4.0: an explorative Dynamic Capabilities theory perspective. *Production Planning and Control*, 36(5), 607–625. <https://doi.org/10.1080/09537287.2023.2294297>
- Lakshmanan, R., Nyamekye, P., Virolainen, V. M., & Piili, H. (2023). The convergence of lean management and additive manufacturing: Case of manufacturing industries. In *Cleaner Engineering and Technology* (Vol. 13). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100620>
- Lean production*. (n.d.).
- Li, M., Qian, X., Li, M., Qu, T., & He, Z. (2025). An order postponement strategy for multi-stage production-logistics synchronization towards zero-warehousing smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 82, 389–404. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2025.06.024>
- Mesarosova, J., Skurkova, K. L., & Vizvary, Z. (2024). DIGITALIZATION OF SHOP FLOOR MANAGEMENT AT SELECTED SEGMENT IN THE INDUSTRIAL ENTERPRISE IN

THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0. *MM Science Journal*, 2024-November, 7715–7723.
https://doi.org/10.17973/MMSJ.2024_11_2024024

Mezher, M. A., Gunawan, I., & Fayezi, S. (2025). Lean 4.0 as a Socio-Technical System: Mapping the Interaction of Soft Practices and Industry 4.0 in Digital Transformation. *Systems*, 14(1), 9.
<https://doi.org/10.3390/systems14010009>

Mota, A. L. S., & Lins, R. G. (2025). Production of customized commercial vehicles in assembly line based on modified-to-order demands: A novel method and study case. *International Journal of Production Economics*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2025.109535>

Pitjamit, S., Jewpanya, P., & Nuangpirom, P. (2024). Enhancing Lean-Kaizen practices through IoT and automation: A comprehensive analysis with simulation modeling in the Thai food industry. *Engineering and Applied Science Research*, 51(3), 286–299.
<https://doi.org/10.14456/easr.2024.28>

Pizoń, J., Wójcik, Ł., Gola, A., Kański, Ł., & Nielsen, I. (2024). Autonomous Mobile Robots in Automotive Remanufacturing: A Case Study for Intra-Logistics Support. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 18(1), 213–230.
<https://doi.org/10.12913/22998624/177398>

Rahardjo, B., Wang, F. K., Yeh, R. H., & Chen, Y. P. (2023). Lean Manufacturing in Industry 4.0: A Smart and Sustainable Manufacturing System. *Machines*, 11(1).
<https://doi.org/10.3390/machines11010072>

Santos, P. J., de Mattos Nascimento, D. L., Fontoura, L., Antony, J., Garza-Reyes, J. A., Small, A., Gusmão Caiado, R. G., & Alsmairat, M. A. K. (2025). Powering efficiency: a Lean Six Sigma 4.0 agenda and roadmap for sustainable energy enhancement. *Production Planning and Control*. <https://doi.org/10.1080/09537287.2025.2581725>

Tripathi, V., & Bhadauria, A. (2026). Smart lean-green framework for sustainable energy optimization and operational excellence in earthmoving equipment manufacturing under Industry 4.0. *Results in Engineering*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109513>

Understanding Lean Thinking and Practice Fundamentals. (n.d.).

Wu, C. H., Ng, S. C. H., Kwok, K. C. M., & Yung, K. L. (2023). Applying Industrial Internet of Things Analytics to Manufacturing. *Machines*, 11(4).
<https://doi.org/10.3390/machines11040448>

- Zhang, S., Bi, X., Tian, R., Chen, T., Ding, K., & Yu, Z. (2025). Lean Digitalization Solutions for SMEs in China. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 72, 1546–1558. <https://doi.org/10.1109/TEM.2025.3557964>
- Zwolińska, B., & Wiercioch, J. (2023). Modelling the Reliability of Logistics Flows in a Complex Production System. *Energies*, 16(24). <https://doi.org/10.3390/en16248071>