



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

*Corso di Laurea triennale in **Ingegneria Gestionale***

**ANALISI DELL'EVOLUZIONE DELLA VALUE STREAM MAPPING
(VSM) COME STRUMENTO STRATEGICO PER
L'ELIMINAZIONE DEGLI SPRECHI**

**ANALYSIS OF THE EVOLUTION OF VALUE STREAM MAPPING
(VSM) AS A STRATEGIC TOOL FOR WASTE ELIMINATION**

Relatore: Chiar.ma
Prof.ssa **Sara Antomarioni**

Tesi di Laurea di:
Davide Pio Lavista

A.A. 2025/2026

INDICE

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1: FONDAMENTI STORICI E METODOLOGICI DELLA PRODUZIONE SNELLA E DEL FLUSSO DI VALORE	3
1.1 La filosofia della Produzione Snella nel contesto industriale	3
1.2 La Value Stream Mapping	4
1.2.1 Classificazione delle attività e identificazione degli sprechi.....	4
1.2.2 Simbologia ed icone	5
1.2.3 Procedura di realizzazione: identificazione delle famiglie di prodotti tramite algoritmi di clustering	8
1.2.4 La mappatura dello stato attuale (<i>Current State Map</i>) e il calcolo dei parametri prestazionali (<i>Lead Time</i> e <i>Takt Time</i>).....	10
1.2.5 La progettazione dello stato futuro (<i>Future State Map</i>)	12
1.3 Digital VSM e Strumenti 4.0	13
1.3.1 L'impatto dell'Industrial Internet of Things (IIoT) e delle industrie intelligenti	13
1.3.2 Modelli integrati di monitoraggio continuo dell'efficienza	13
1.4 Electronic Value Stream Mapping (eVSM)	14
1.4.1 Integrazione tra Lean Production, simulazione ibrida e Industria 4.0.....	14
1.4.2 Strumenti applicativi e piattaforme software per l'eVSM	15
1.5 La VSM applicata al Project Management.....	16
CAPITOLO 2: METODOLOGIA DELLA RICERCA BIBLIOGRAFICA.....	18
2.1 Introduzione alla Strategia di Ricerca	18
2.2 Il Framework Metodologico PRISMA 2020	18
2.3 Definizione dei Criteri di Eleggibilità	20
2.4 Strategia di Interrogazione e Raccolta dei Record	22
CAPITOLO 3: ANALISI DELLA LETTERATURA ED EVOLUZIONE DEI MODELLI DI VALUE STREAM MAPPING NELL'ERA 4.0 E 5.0	23
3.1 Innovazione ed evoluzione digitale nella Lean Manufacturing	23

3.2 Digitalizzazione e monitoraggio real-time.....	24
3.3 Sostenibilità integrata e modelli multidimensionali.....	41
3.4 Simulazione avanzata ed ottimizzazione dei processi	46
3.5 Confronto tra diversi settori di applicazione	51
CAPITOLO 4: ANALISI COMPARATIVA E DISCUSSIONE DEI RISULTATI	57
4.1 Sintesi dei risultati per ciascun modello analizzato	57
4.2 Tabelle sinottiche di confronto prestazionale	58
4.3 Analisi delle Limitazioni e degli Sviluppi Futuri	60
4.4 Matrice di Posizionamento Strategico (Trade-offs e Requisiti)	61
4.5 Discussione dei risultati e sintesi dell'evoluzione.....	61
CONCLUSIONI	63
BIBLIOGRAFIA.....	65

INTRODUZIONE

Nel panorama industriale odierno, caratterizzato da una globalizzazione pervadente, da mercati particolarmente volatili e dalla diffusione di paradigmi produttivi come l'High-Mix Low-Volume, l'efficienza non è più solamente un semplice vantaggio competitivo ma è diventata un prerequisito fondamentale per la sopravvivenza delle organizzazioni aziendali. All'interno di questo contesto che muta continuamente, la filosofia della Lean Production (Produzione Snella) si è imposta, nel susseguirsi degli anni, come l'approccio metodologico principale per guidare le imprese verso l'ottimizzazione dei processi, prefiggendosi di massimizzare il valore per il cliente finale tramite l'identificazione e l'eliminazione sistematica di ogni forma di spreco (Muda).

Tra i numerosi strumenti operativi derivanti dal celebre Toyota Production System, la Value Stream Mapping (VSM) riveste un ruolo strategico di primo livello. Inizialmente ideata come metodologia visuale e manuale basata su "carta e matita", la VSM consente di mappare sia il flusso fisico dei materiali sia il flusso logico delle informazioni aziendali, creando una fotografia dettagliata del Current State Map per poi progettarne la sua evoluzione ottimizzata, il Future State Map. Nonostante la sua nota efficacia nel calcolo di indicatori chiave come il Lead Time ed il Takt Time, la VSM tradizionale presenta ancora notevoli limiti, specialmente se applicata nei contesti di fabbrica digitalizzata moderni. A causa della sua natura tipicamente statica e legata a rilevazioni manuali, questo strumento risulta spesso inadeguato per prendere decisioni rapide in casi di domanda dinamica o di processi che variano repentinamente.

Il seguente lavoro di tesi si propone di analizzare in maniera critica l'evoluzione della Value Stream Mapping, mostrando come questo strumento sia passato dall'essere un modello statico ad essere una piattaforma strategica e dinamica di controllo grazie all'avvento della quarta e quinta rivoluzione industriale. L'inclusione delle tecnologie tipiche dell'Industria 4.0 ha reso possibile il passaggio verso la Digital e l'Electronic VSM (eVSM), monitorando in tempo reale l'efficienza e l'automazione dei calcoli prestazionali. In aggiunta, sulla base dei pilastri dell'Industria 5.0, ci si sta muovendo verso l'utilizzo di modelli multidimensionali capaci di integrare gli indicatori produttivi

ed economici con parametri legati alla sostenibilità ambientale e sociale, facendo particolare attenzione all'ergonomia ed al benessere dei lavoratori.

Per mappare in maniera riproducibile lo Stato dell'Arte sulle tematiche presentate, la ricerca bibliografica è stata condotta applicando il framework metodologico PRISMA 2020 avvalendosi del database scientifico Scopus. I diversi risultati scientifici raccolti sono stati analizzati e suddivisi all'interno del nucleo centrale della tesi, incentrandosi su tre macro-aree, quali: la digitalizzazione e il monitoraggio real-time tramite l'utilizzo di Digital Twin e sistemi di posizionamento indoor (IPS); l'integrazione della sostenibilità nei modelli transazionali; l'applicazione di tecniche di simulazione ibrida, ad eventi discreti ed approcci Six Sigma per l'ottimizzazione predittiva dei processi.

In conclusione, nell'elaborato è presente un'analisi comparativa ed una discussione critica dei risultati ottenuti dalla letteratura, formalizzato tramite tabelle schematiche di benchmarking e matrici di posizionamento strategico. La tesi definisce come suo obiettivo finale quello di fornire una tabella di marcia che affianchi i manager industriali nello scegliere la traiettoria di digitalizzazione snella più idonea, bilanciando i compromessi tecnologici ed operativi sulla base delle esigenze specifiche dei contesti aziendali.

CAPITOLO 1: FONDAMENTI STORICI E METODOLOGICI DELLA PRODUZIONE SNELLA E DEL FLUSSO DI VALORE

1.1 La filosofia della Produzione Snella nel contesto industriale

In un contesto industriale caratterizzato da una domanda altamente volatile (High-Mix Low-Volume), l'efficienza operativa non è più un vantaggio competitivo, ma un requisito di sopravvivenza.

In questo ambito opera la Lean Production (in italiano “Produzione Snella”), che è un approccio alla gestione che mira a massimizzare l'efficienza produttiva attraverso la minimizzazione degli sprechi garantendo certi standard di qualità. La Lean Production permette alle organizzazioni di individuare eventuali inefficienze e di eliminarle. Per questo, è più corretto parlare di filosofia Lean in cui si persegue una situazione di miglioramento continuo rispetto allo stato attuale delle cose [1].

I cinque principi fondamento della Lean Production permettono di coprire l'intero ciclo produttivo e sono:

- *Valore del cliente*: permette di identificare il valore che i vari compratori attribuiscono ai diversi prodotti. La conoscenza di questo valore, inoltre, consente alle aziende di capire quali e quanti sprechi eliminare dal processo produttivo e scegliere un adeguato prezzo target per ottenere i margini di profitto più alti possibili.
- *Flusso di valore*: rappresenta l'intero ciclo di vita del prodotto e cioè tutte le fasi ed i materiali che sono necessari per realizzare e vendere un prodotto. In questa maniera, risulterà più semplice per le aziende identificare gli sprechi da eliminare.
- *Flusso continuo*: le attività, in azienda, devono avvenire senza alcun tipo di interruzione, con flusso continuo. Per questa ragione, l'obiettivo della Lean è quello di agevolare il flusso di valore dall'inizio alla fine, fino ad arrivare al cliente.
- *Customer pull*: in questa fase vige il principio secondo il quale nulla viene prodotto se non è stato prima ordinato da un cliente. Si dice che è il mercato che

“tira” la produzione, proprio per permettere all'azienda di produrre le quantità necessarie al momento giusto, evitando così sprechi.

- *Perfezione*: eliminare i Muda (sprechi) è una sfida costante per le aziende. Nasce così una vera e propria cultura del miglioramento basata sulla ricerca continua ed incessante della perfezione, in modo tale che i tempi di produzione e i costi diminuiscano progressivamente fino a livelli minimi [2].

1.2 La Value Stream Mapping

1.2.1 Classificazione delle attività e identificazione degli sprechi

La Value Stream Mapping è un metodo di gestione Lean nato negli anni '80 all'interno della casa automobilistica giapponese Toyota. Le modalità con cui opera la VSM permettono di analizzare lo stato attuale e lo sviluppo futuro di un target, permettendo di avere una rappresentazione visiva delle varie fasi di un processo necessarie per completare un prodotto o servizio. Permette, inoltre, di tenere traccia del flusso dei materiali, che opera dai fornitori verso i clienti, e delle informazioni, che si muovono dai clienti verso i fornitori [3].

- All'interno della VSM sono presenti delle attività di diversa tipologia che permettono all'azienda di soddisfare la domanda del cliente. Si possono avere: attività a valore aggiunto che sono acquistate dal cliente;
- attività non a valore aggiunto che non generano valore per il cliente ma sono necessarie per l'azienda [4];
- attività non a valore che causano lo spreco di risorse.

Per realizzare una VSM di livello, bisogna sempre registrare i processi che si stanno verificando in un determinato momento attraverso una riproduzione fedele delle attività che concorrono alla realizzazione di un prodotto. Successivamente, si tende ad ottimizzare il processo verso una situazione futura nella quale si indica il modo in cui si vuole vedere il prodotto all'interno del flusso di valore [5].

L'utilizzo della Value Stream Mapping ha apportato benefici tangibili in termini di presa di coscienza e comprensione dei processi rilevanti in azienda da parte dei dirigenti.

Specifica, inoltre, di quanto la produzione a lotti e gli inventari intermedi rallentino il ritmo produttivo incrementando così il Lead Time, ovvero il tempo che intercorre tra il rilascio dell'ordine di produzione di un prodotto e il completamento del prodotto stesso. Questa tecnica aiuta ad identificare le cause degli sprechi in un flusso ma, soprattutto, consente di riconoscere le opportunità di miglioramento e gli interventi per ottimizzare i processi.

1.2.2 Simbologia ed icone

SIMBOLI RELATIVI AL FLUSSO (FISICO, INFORMATIVO, TEMPORALE):		SIMBOLI RELATIVI AL MIGLIORAMENTO DEI PROCESSI:	
	Flusso fisico		Obiettivo kaizen
	Informazione elettronica		"Supermarket"
	Informazione manuale		Postazione kanban
	Flusso fisico in ingresso/uscita dall'azienda		Flusso kanban
	Time Line		Kanban "ordine di produzione" (<i>Production</i>)
SIMBOLI RELATIVI AI PROCESSI INTERNI ED ESTERNI:			Kanban "prelievo" (<i>Withdrawal</i>)
	Process Box		Kanban "segnale" (<i>Signal</i>)
	Process Box (processi multipli)		"corsia FIFO"
	Process Box (generico)		Cella produttiva a forma di "U"
	Fornitore esterno, cliente esterno		Magazzino "buffer"
	Informazioni relative al Process Box		Scorte di sicurezza
	Magazzino		
	Operatore		
	Processo assistito da computer (MRP)		

Figura 1.1 - Simbologia ed icone della Value Stream Mapping

Per progettare una VSM efficace ed efficiente, bisogna partire dal mappare il valore all'interno dei vari processi, rappresentandoli dall'inizio alla fine. Per fare ciò, è necessario conoscere i simboli riconosciuti a livello internazionale che sono usati in

questi diagrammi di flusso. Si possono avere simboli relativi al flusso, ai processi interni ed esterni e al miglioramento dei processi.

SIMBOLI RELATIVI AL FLUSSO FISICO

- Flusso fisico: è una freccia che indica l'attività di spingere il materiale a valle, facendolo scorrere da un processo a quello successivo;
- Informazione elettronico: indica un flusso di informazioni che sono generate elettronicamente attraverso Internet e reti LAN;
- Informazione manuale: è una freccia che simboleggia un flusso di informazioni prodotto manualmente, come report o semplici conversazioni. È sempre consigliato specificare la frequenza di aggiornamento di queste informazioni;
- Time line: è la linea temporale usata per confrontare due cose senza soffermarsi sulle risorse consumate e sui rifiuti generati;

SIMBOLI RELATIVI AI PROCESSI INTERNI ED ESTERNI

- Process Box: rappresenta il flusso delle fasi del processo necessarie per completare un prodotto o servizio dall'ordine alla consegna. Si usa questo simbolo quando si vuole evitare di specificare tutte le singole attività, riunendole in un corpo unico;
- Cliente/fornitore: se quest'icona è posizionata nello schema in alto a sinistra (punto in cui solitamente inizia il flusso dei materiali) identifica il fornitore mentre se si trova in alto a destra (nel punto dove termina il flusso dei materiali) identifica il cliente;
- Informazioni relative al process box: è un'icona che riporta una serie di informazioni tra cui la frequenza delle spedizioni del materiale, le informazioni relative alla sua movimentazione, la grandezza dei lotti movimentati. In particolare, viene riportato il Cycle Time, cioè il tempo necessario per il ciclo ed è misurato in secondi, il Changeover Time, che è il tempo necessario per l'attrezzaggio, e le informazioni relative al lotto di materiale processato;
- Magazzino: il triangolo equilatero sta ad indicare un magazzino che si trova tra due processi, all'interno di un flusso in continuo movimento. La stessa icona può rappresentare un magazzino di materie prime o di prodotti finiti;

- Operatore: la sua icona rappresenta il numero di operatori richiesti per svolgere una determinata attività;
- Processo assistito da computer (MRP): il cilindro indica la presenza di sistemi MRP con software che pianificano e controllano le materie prime ed i componenti necessari per produrre prodotti finiti;

SIMBOLI RELATIVI AL MIGLIORAMENTO DEI PROCESSI

- Obiettivo Kaizen: riguarda la necessità di miglioramento di eventi Kaizen su un processo specifico che risulta critico per la VSM;
- Supermarket: è un piccolo magazzino Kanban, posto in reparto, che contiene i materiali che l'operatore del processo a valle del magazzino Kanban può utilizzare. A monte, l'approvvigionamento dei materiali utilizzati è regolato in modo tale che nel "supermarket" sia sempre disponibile ciò che serve e nelle quantità opportune;
- Postazione Kanban: è quel posto fisico dove vengono riposti i cartellini Kanban che sono in attesa di essere prelevati dall'operatore;
- Kanban Production (produzione): identifica la produzione di un numero predefinito di pezzi e segnala al processo a monte di produrre materiale per il processo a valle;
- Kanban Withdrawal (prelievo): sta ad indicare un cartellino che fornisce istruzioni riguardanti il materiale che deve essere movimentato o prodotto in base a quelle che sono le esigenze del processo a valle;
- Kanban Signal (segnale): indica la necessità di rifornire materiali in un magazzino Kanban perché la quantità di materiali è scesa al di sotto di un livello stabilito. Alla presenza di questo segnale, l'operatore deve aumentare la grandezza del lotto di produzione perché a valle c'è maggiore richiesta;
- Corsia FIFO: magazzino gestito in base alla logica FIFO (First In First Out), secondo la quale il primo che entra sarà il primo ad uscire. Ad esempio, all'interno del magazzino verrà prelevato prima il materiale presente da più tempo in seguito ad una richiesta derivante da un cliente o dai processi interni;
- Cella produttiva a forma di "U": è un simbolo che sta ad indicare che i processi sono integrati in celle produttive ed ogni cella può processare solamente un certo numero di

famiglie di prodotti simili. In questo processo, i prodotti si muovono in piccoli lotti o in pezzi singoli;

- Scorte di sicurezza: identificano uno stock di sicurezza che interviene per risolvere problemi dovuti all'attrezzaggio o ad un fermo linea. Protegge tutto il sistema dalle fluttuazioni interne ed esterne (come la variazione della domanda dei clienti) ed indica un magazzino temporaneo, non permanente. Inoltre, è richiesta una precisa strategia manageriale per stabilire con certezza quando predisporre uno stock di questo genere [6] [7].

1.2.3 Procedura di realizzazione: identificazione delle famiglie di prodotti tramite algoritmi di clustering

La costruzione della Value Stream Mapping è un processo analitico che si articola in fasi sequenziali e rigorose. Per garantire che la mappatura diventi la base decisionale del progetto, è necessario seguire la metodologia standard che prevede alcuni passaggi specifici.

Identificazione della famiglia di prodotti

Il primo passo da fare per costruire la Value Stream Mapping è quello di dividere i prodotti in celle produttive e capire quali articoli possono effettivamente essere lavorati insieme. Quando una serie di prodotti ha in comune il fatto che il loro ciclo di fabbricazione comporti l'utilizzo degli stessi macchinari, si parla di famiglia di prodotti. Per questa ragione, si può predisporre un lay-out in modo tale che le macchine siano raggruppate in un certo numero di gruppi. A questi gruppi viene, poi, assegnata una specifica famiglia di prodotti e la tecnologia è specifica per ogni famiglia. Questa filosofia di lavorazione è chiamata Group Technology. Operando in questa maniera, si possono ottenere una serie di vantaggi, tra cui una maggiore efficienza del processo ed un minor tempo di setup della macchina [8].

Ad oggi, si utilizzano dei metodi per identificare le famiglie di prodotto che sono molto più agili rispetto all'ormai obsoleto metodo del Production Flow Analysis. Quest'ultimo metodo è considerato vecchio perché si basa su un'analisi qualitativa, oggettiva e

dispendiosa in termini di tempo, causando rallentamenti e colli di bottiglia per le aziende che producono migliaia di articoli.

Attualmente i due metodi più utilizzati sono l'Algoritmo di Ordinamento Binario ed i Coefficienti di Similarità, che sono in grado di raccogliere e trattare matrici di grandi dimensioni. Si applicano con più facilità rispetto al metodo precedente perché non richiedono interpretazioni umane e si possono applicare con regole chiare e calcoli più semplici. Entrambi sono basati su dati estratti da un foglio di lavoro ed automatizzano il confronto tra componenti, rendendolo oggettivo.

L'Algoritmo di Ordinamento Binario è un metodo che permette di individuare famiglie di prodotti partendo da una matrice, chiamata matrice binaria, in cui le righe rappresentano le macchine disponibili in stabilimento mentre nelle colonne sono riportati i pezzi che devono essere lavorati. Se in una cella è presente 1, significa che quel pezzo richiede una lavorazione su quella macchina, altrimenti contiene 0. Successivamente, si procede con il riordinare le righe e le colonne evidenziando blocchi compatti di 1, chiamati cluster di prodotto, che sono un insieme di pezzi che hanno cicli produttivi simili e vengono trattati all'interno della stessa cella produttiva. In questa maniera, è possibile ridurre al minimo i passaggi superflui tra le macchine generando un layout a blocchi compatti.

D'altrocanto, il metodo dei Coefficienti di Similarità è una specie di detective industriale perché ha come obiettivo quello di quantificare la somiglianza tra due prodotti, attribuendo un punteggio numerico basato su una serie di criteri. Questi criteri vengono, poi, pesati e confrontati e, infine, si ottiene un indice che va da 0 (quando i due prodotti sono completamente diversi) ad 1 (prodotti identici). Il vantaggio di questo metodo è la flessibilità perché si possono scegliere le caratteristiche a cui dare più peso in base alle esigenze aziendali, permettendo così di creare celle produttive più intelligenti.

La scelta tra l'utilizzo di un metodo o l'altro dipende anche dal contesto in cui ci si trova. Il primo metodo è preferibile utilizzarlo quando si hanno prodotti standardizzati e si vuole ottenere un cluster in maniera rapida, anche utilizzando un algoritmo in Excel. Il secondo metodo, invece, è utile quando i prodotti da trattare sono complessi e con molte variabili da tenere in considerazione. Permette di avere una classificazione più

raffinata, valida anche per scelte strategiche future. In definitiva, la scelta migliore è quella di usare entrambi i metodi in sequenza [9].

1.2.4 La mappatura dello stato attuale (*Current State Map*) e il calcolo dei parametri prestazionali (*Lead Time* e *Takt Time*)

La mappatura del flusso di valore è un metodo che la VSM utilizza per illustrare ed analizzare un processo di produzione. La mappatura del flusso di valore consta in quattro passaggi tra cui mappare il processo attuale, trovare ed eliminare gli sprechi, mappare il processo futuro migliorato ed, infine, implementarlo. I vari passi della mappatura del flusso di valore vanno sviluppati in maniera dettagliata a seconda della specifica situazione in esame. È uno strumento visuale che permette di tenere sotto controllo costante la produzione usufruendo anche di un diagramma a blocchi del flusso dei processi che vanno dall'accettazione alla consegna [10].

Talvolta, può essere utile lavorare in team per mappare il flusso di valore ed implementare il processo di produzione migliorato. Possibilmente, avere un team interfunzionale può essere vantaggioso perché composto da membri provenienti da reparti differenti e questo fornisce le competenze necessarie per soddisfare le esigenze dei clienti. Inoltre, prima di mappare il flusso di valore è fondamentale specificare l'ambito del progetto altrimenti sarebbe difficile identificare ed eliminare gli sprechi in seguito. Dopo aver definito l'ambito della VSM, si può procedere con la creazione della mappa usufruendo dei simboli standard del flusso del valore per mostrare il modo in cui le informazioni scorrono tra le varie attività lavorative.

Dopo aver ottenuto il flusso del valore, si possono aggiungere alcuni dati che servono per confrontare aspetti come il tempo, quantità e qualità tra tutte le fasi del processo. Tra i vari dati di cui tener conto rientrano il livello dell'inventario, ovvero le scorte intermedie e finali, il tempo di ciclo per unità (Cycle Time), tempo di trasferimento, numero di membri del team per effettuare i vari passaggi, numero di prodotti scartati e di prodotti presenti nel lotto di lavorazione, e il "Takt Time", cioè la velocità da mantenere se si vuole produrre prodotti al fine di soddisfare la domanda dei clienti [11].

Fondamentale è avere una cronologia chiara per ogni processo di produzione ed i ritardi possono compromettere tutto il flusso di lavoro. Per cui, tenere conto del tempo di esecuzione e del tempo di ciclo può essere utile. Il primo è il tempo totale di cui il team necessita per completare un'attività, a partire dal momento in cui l'attività entra per la prima volta nel flusso di lavoro fino al suo completamento. D'altro canto, il tempo di ciclo è la parte del tempo di consegna totale in cui si completa un'attività ed è noto anche come tempo a valore aggiunto.

All'interno della mappa dello stato del flusso attuale sono presenti delle aree che devono essere ottimizzate. Per completare questa mappa, bisogna compilarla con i dati del progetto per rendere visibili le aree di spreco. Le aree di spreco più diffuse nella gestione Lean riguardano la sovrapproduzione, l'inventario, il movimento da un'attività all'altra, difetti e trasporto. Il modo migliore per analizzare la mappa è quello di utilizzare i principi Kaizen su tutte le aree di spreco individuate, ciò permette di generare idee a valore aggiunto per la mappa del flusso di valore dello stato futuro.

A questo punto è possibile disegnare la mappa del flusso del valore dello stato futuro, che deve contenere gli elementi Kaizen per le aree che bisogna migliorare. È possibile utilizzare il software Kanban per implementare un pull e migliorare il flusso di informazioni. In base ai diversi casi e processi, si possono aggiungere alla mappa determinati simboli, tra cui quello del supermercato, kanban di produzione e di ritiro del materiale, pull del materiale e pull sequenziato.

Infine, l'ultima fase del processo VSM è quella in cui si implementano le soluzioni della mappa dello stato futuro nel processo di lavoro ed è possibile visualizzare i risultati dell'analisi della mappa [12].

Calcolo dei parametri prestazionali

Per far in modo che la rappresentazione grafica del flusso di valore sia completa bisogna includere le metriche che rendono oggettivo lo stato di salute del processo. Nella VSM, l'indicatore chiave di prestazione (KPI) principale è il Production Lead Time, ovvero il tempo che intercorre tra l'inizio e la fine di un processo produttivo, e consente di avere un alto livello di servizio minimizzando le scorte di magazzino e massimizzando lo

sfruttamento degli impianti. Per calcolare questo valore è possibile sommare i vari tempi presenti nell'ambito produttivo come il tempo di coda, di attrezzaggio della macchina, di lavorazione, di fermo, di attesa e di movimentazione. Un metodo che facilita il calcolo del Lead Time di produzione è il sistema MES che raccoglie i dati di produzione e calcola questo valore in tempo reale [13].

Un altro parametro da conoscere è il Takt Time e sta ad indicare le aspettative del cliente e, quindi, è il ritmo da avere nella produzione dei componenti per soddisfare le richieste dei clienti. In formule, può essere calcolato come il rapporto tra il tempo disponibile ed i beni richiesti. Se i beni non sono prodotti nel rispetto del Takt Time, i clienti risulteranno insoddisfatti e potrebbero cercare un altro fornitore anziché attendere. Per questa ragione, è importante rispettare il Takt Time sia per tutelare il rapporto azienda-cliente e sia per garantire un ritmo di produzione costante, permettendo di calcolare i tempi ideali di approvvigionamento in maniera più semplice.

1.2.5 La progettazione dello stato futuro (*Future State Map*)

La mappatura dello stato futuro si basa sull'analisi della Current State Map dalla quale si individuano le imperfezioni nel flusso di valore con l'obiettivo di ottimizzare l'affidabilità del processo. La Future State Map fornisce una rappresentazione visiva delle fasi di un processo dopo alcuni mesi di miglioramenti. L'obiettivo principale di questa fase è creare un processo che elimini gli ostacoli identificati nella mappa di stato corrente. La Future State Map è il metodo da utilizzare dopo che è stato definito il processo di miglioramento e fornisce un obiettivo a cui tendere. Il fine ultimo di questo processo è quello di ottenere un flusso equilibrato che vada incontro alle esigenze dei clienti finali senza penalizzare la produzione ed il fatturato dell'azienda [14].

1.3 Digital VSM e Strumenti 4.0

1.3.1 L'impatto dell'Industrial Internet of Things (IIoT) e delle industrie intelligenti

Negli ultimi anni, il panorama industriale globale è cambiato drasticamente grazie alle innovazioni che hanno trasformato il mondo fisico in un mondo digitalizzato, dove ogni cosa è connessa.

La prima rivoluzione industriale ha consentito l'introduzione dell'energia idroelettrica ed a vapore con lo sviluppo di macchine utensili; la seconda rivoluzione industriale ha diffuso l'elettricità e la produzione di massa con le catene di montaggio; con la terza rivoluzione industriale si è fatto un ulteriore passo in avanti verso l'automazione e le tecnologie informatiche; attualmente è in atto la quarta rivoluzione industriale, guidata dall'Internet delle cose (IoT) che porterà le industrie ad un nuovo livello di crescita e competitività.

Questi progressi tecnologici integrano tecnologie innovative all'interno delle industrie tradizionali per aumentare la produttività e la flessibilità dei processi produttivi. Si stanno diffondendo sempre di più le industrie intelligenti in cui il mondo fisico è collegato a quello digitale, anche grazie all'utilizzo di strumenti come l'intelligenza artificiale (AI) e l'Internet delle cose. In questo tipo di aziende, anche le macchine ed attrezzature sono collegate tra di loro e comunicano con un sistema di controllo centrale per monitorare i dati ed analizzare il processo decisionale in tempo reale.

In merito a questo, è stato creato un sotto-segmento dell'IoT, noto come Internet delle cose Industriale (IIoT), che si riferisce all'impiego dell'IoT all'interno dei processi industriali con particolare attenzione alla comunicazione machine-to-machine ed ai big data per connettere sensori e dispositivi ad Internet.

1.3.2 Modelli integrati di monitoraggio continuo dell'efficienza

Nell'attuale scenario, la transizione digitale comprende anche la Lean Manufacturing integrata con l'Industria 4.0 e con l'Internet of Things. Questo è un aspetto fondamentale per imprenditori e manager perchè favorisce lo sviluppo e la crescita dell'azienda. L'integrazione del Lean Manufacturing con l'Internet delle cose è un'evoluzione naturale della produzione industriale permettendo, così, di potenziare,

efficientare ed automatizzare i processi produttivi. Non a caso, l'obiettivo è quello di migliorare le prestazioni di qualsiasi tipo di produzione attraverso un sistema IVSM. Implementare questo modello in un ambiente di produzione consente di migliorare le prestazioni del sistema attuale e di monitorare continuamente il processo grazie ad un sistema integrato di monitoraggio dell'efficienza (IEMS).

Questo è possibile perché l'IoT facilita la connessione tra macchine e dispositivi che sono in grado di scambiare dati in tempo reale e ciò consente di avere processi decisionali autonomi ed intelligenti. Un'analisi Gartner stima che nel 2025 oltre 75 miliardi di dispositivi IoT risultavano connessi globalmente, dei quali un numero significativo era presente nel settore manifatturiero. L'impiego dell'IoT nel mondo della manifattura offre numerosi vantaggi, quali l'utilizzo di sensori e dispositivi che consentono di raccogliere dati in tempo reale, il monitoraggio delle prestazioni delle macchine e la creazione dei “gemelli digitali” per simulare scenari (what-if) e prevedere eventuali guasti prima che accadano [15].

1.4 Electronic Value Stream Mapping (eVSM)

1.4.1 Integrazione tra Lean Production, simulazione ibrida e Industria 4.0

Uno degli aspetti più importanti che ha portato la quarta rivoluzione industriale è quello che riguarda l'integrazione della Lean Production con l'Industria 4.0, che con le sue tecnologie innovative può migliorare la competitività del settore manifatturiero. In particolar modo, l'attenzione si concentra su come poter integrare la Value Stream Mapping con la Hybrid Simulation (HS) per combinare la modellazione e simulazione ad eventi discreti. A differenza della VSM tradizionale che permette alle organizzazioni aziendali di identificare inefficienze nei sistemi e migliorare i processi, la eVSM (electronic Value Stream Mapping) trasforma ed ottimizza il processo in uno strumento di continuo miglioramento. La eVSM permette di eliminare la revisione dei processi a causa di errori umani perché i team si muovono all'interno di un ambiente digitale, in cui i calcoli più complessi, come quello del takt time o dei tempi di ciclo, sono gestiti da appositi software che garantiscono una precisione maggiore rispetto al caso in cui sia l'uomo a svolgere queste attività. Un altro vantaggio legato all'utilizzo della eVSM

permette di creare uno strumento che si adatta all'organizzazione, nel senso che la mappa si aggiorna man mano che i processi cambiano. Per cui è uno strumento molto efficace che aiuta il team ad identificare nuove opportunità o a monitorare i progressi, adottando eventuali modifiche nel tempo.

La nascita della eVSM è stata il frutto della collaborazione con John Shook, nonché una delle massime autorità del settore della filosofia Lean. In questa maniera, la eVSM è stata messa a punto per essere molto di più di un semplice strumento di mappatura. Non a caso, fin dalla sua invenzione, questo software comprende al suo interno gli strumenti principali della Lean, come l'analisi dei colli di bottiglia o i calcolatori del takt time. Gli strumenti della eVSM si integrano a pieno nel modo di pensare dei professionisti Lean, permettendo così di avere un impatto duraturo [16].

1.4.2 Strumenti applicativi e piattaforme software per l'eVSM

L'adozione di sistemi di *electronic Value Stream Mapping* (eVSM) rappresenta un'evoluzione fondamentale rispetto all'approccio manuale, in quanto permette di minimizzare la necessità di revisioni continue dovute a errori di trascrizione o analisi umana. L'integrazione di software specialistici consente, infatti, di delegare la gestione di calcoli complessi ad algoritmi automatizzati che garantiscono una precisione sensibilmente superiore e una maggiore affidabilità del dato finale. Per cui è fondamentale avere uno strumento che sia efficiente nella creazione dei diagrammi e che offra funzioni per facilitare il lavoro da svolgere.

Una delle applicazioni più utilizzate per questo fine è Lucidchart che è una piattaforma web che consente di creare grafici e diagrammi, tra cui diagrammi di flusso, diagrammi ER e mappe del flusso di valori. È un'applicazione disponibile sul web, non è richiesta l'installazione e può essere usata su qualsiasi computer, si può lavorare anche in team in cui ogni membro lavora ad uno stesso progetto a prescindere da dove si trovi. Per usufruire di funzionalità avanzate, però, è necessario un abbonamento a pagamento [17].

Un ulteriore software di notevole importanza per mappare il flusso di valore è Visio, che consente di creare diagrammi in modo flessibile. Anche se, per avere una soluzione che offra le funzionalità della Lean, eVSM rimane la soluzione ideale perché rende Visio uno strumento Lean avanzato incentrato sulla produzione, sulla supply chain e su flussi di processo complessi. Grazie alle possibilità che offre l'eVSM, si possono prendere decisioni basate sui dati e ciò conferisce una maggiore efficacia alla mappatura del flusso di valore. L'eVSM, inoltre, possiede una serie di strumenti Lean che ottimizzano l'efficienza dei processi perché eliminano del tutto i calcoli manuali permettendo di concentrarsi totalmente sul miglioramento. Per di più, questo software semplifica anche l'utilizzo della mappatura del flusso di valore offrendo assistenza pratica durante la creazione della prima mappa, così facendo si può prendere dimestichezza con questa piattaforma [18].

Tra gli altri software utilizzabili è presente anche SmartDraw per la creazione di diagrammi dei flussi di valore, è disponibile sia in versione online che desktop, offre vari modelli predefiniti con cui iniziare ma possiede opzioni di registrazione limitate.

Altri software disponibili e pronti all'utilizzo in questo ambito sono Atlassian ed EdrawMax. Il primo è uno strumento di gestione del team che consente di creare mappe di flussi di valore con un numero praticamente illimitato di pagine usufruibili e protette da permessi per l'accessibilità esterna. In aggiunta, offre una facile organizzazione del lavoro e modelli con cui iniziare ed è una delle app più diversificate e ricche di funzionalità. Il secondo software, invece, è disponibile su tutte le principali piattaforme, è facile da usare e particolarmente efficiente nella creazione di diagrammi per la stragrande maggioranza delle industrie. È in grado di funzionare con Windows, macOS ed è di facile integrazione con Visio, consente di caricare i lavori creati su Google Drive ma la licenza perpetua può essere utilizzata al massimo su due dispositivi alla volta.

1.5 La VSM applicata al Project Management

Un altro ambito in cui può essere applicata la VSM è quello del Project Management, che consente di visualizzare lo scorrimento delle attività lungo il flusso di lavoro, identificando le zone dove si crea valore e altre zone in cui ci sono attese o ritardi. La

VSM è uno strumento che può essere applicato in diverse fasi del ciclo di vita di un progetto data la sua estrema versatilità sia per progetti ripetitivi, quali lo sviluppo di un prodotto, sia per iniziative uniche.

Si può pensare di utilizzare la VSM nella fase iniziale di un progetto perchè permette di partire da quella che è la dinamica reale del flusso, tenendo conto di come le attività si influenzano a vicenda. Per cui il processo ed il progetto vengono posti sullo stesso piano. Può essere impiegato anche a progetto in corso in caso di rallentamenti nel processo permettendo di fotografare lo stato attuale del flusso e identificare le cause del problema ed avviare micro-ottimizzazioni ad alto impatto. Infine, nell'ottica del miglioramento continuo la VSM consente di replicare i modi più efficaci per gestire un flusso ed ogni ottimizzazione potrebbe diventare un vantaggio competitivo. Per questo, la forza della VSM è strategica facendo conciliare il lavoro da svolgere con quello che i clienti percepiscono come valore [19].

CAPITOLO 2: METODOLOGIA DELLA RICERCA BIBLIOGRAFICA

2.1 Introduzione alla Strategia di Ricerca

Il presente capitolo si propone di illustrare in modo sistematico e trasparente la metodologia adottata per la conduzione della ricerca bibliografica, propedeutica alla mappatura dello Stato dell'Arte sui temi della *Value Stream Mapping 4.0*. L'analisi della letteratura scientifica rappresenta un pilastro fondamentale nel disegno di una tesi ingegneristica, in quanto permette di circoscrivere i confini della conoscenza attuale e di identificare i principali trend innovativi, tecnologici e di sostenibilità legati al flusso del valore. È, quindi, fondamentale comunicare in maniera chiara ed accessibile ad ogni individuo della società le conoscenze scientifiche. Ciò è possibile grazie alle revisioni sistematiche che consentono di sintetizzare le conoscenze acquisite rispetto ad un certo tema, creando così una base solida di conoscenza pubblica.

Le revisioni sistematiche della letteratura sono un processo sistematico e metodico che permettono di raccogliere e valutare informazioni, sintetizzando diversi studi e fornendo una comprensione più solida di un argomento. Per garantire trasparenza e riproducibilità per la divulgazione dei risultati, le revisioni sistematiche aderiscono a specifiche linee guida di rendicontazione, come il metodo PRISMA [20].

2.2 Il Framework Metodologico PRISMA 2020

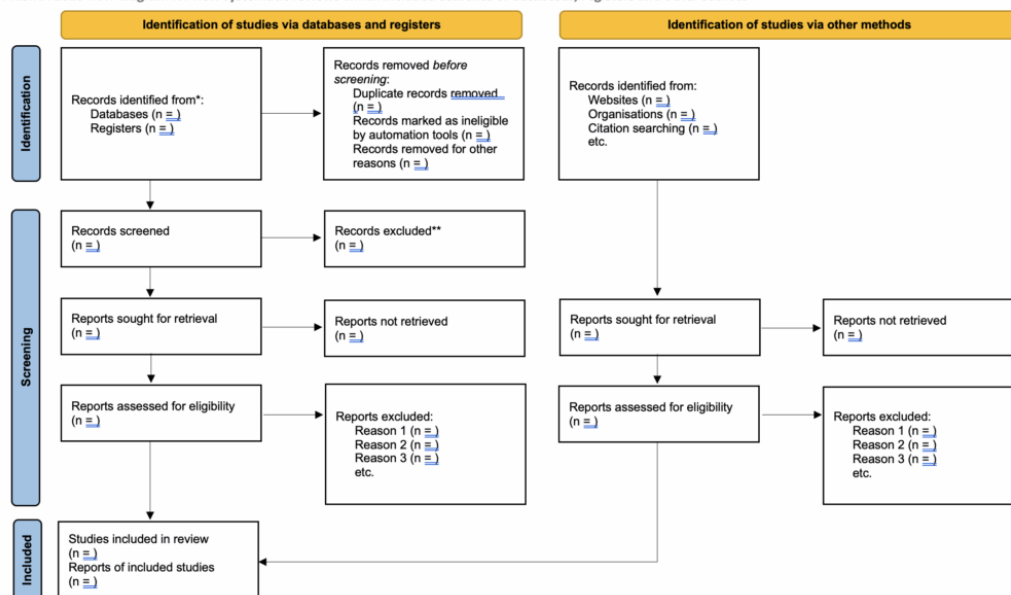
Il PRISMA Statement (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses) è una linea guida metodologica che definisce la conduzione ed il report di una revisione sistematica e meta-analisi ed è stata pubblicata per la prima volta nel 2009. Queste linee guida sono riconosciute a livello internazionale e sono composte da una checklist dettagliata e da un diagramma di flusso per supportare ogni fase del processo di reporting. Negli ultimi anni, è stato richiesto un aggiornamento delle linee guida a causa dei numerosi cambiamenti che si sono verificati dal punto di vista metodologico.

È nato così il PRISMA 2020 che include una nuova guida di reporting che riflette i cambiamenti nei metodi di identificazione e valutazione degli studi primari.

Il cuore centrale del metodo PRISMA è costituito da una checklist di 27 elementi che dovrebbe essere inclusa nel report delle revisioni sistematiche. Gli elementi fondamentali sono il titolo e l'abstract. Il titolo identifica esplicitamente la natura metodologica dello studio, deve prevedere le diciture "revisione sistematica" e "meta-analisi" per una corretta indicizzazione nei database scientifici. L'abstract, invece, è il secondo elemento più visibile dopo il titolo ed al suo interno deve contenere informazioni come obiettivi, fonti dei dati, metodi di valutazione e sintesi dei risultati con le conclusioni ed eventuali limiti. In quest'ultima parte dei risultati è necessario specificare come sono stati selezionati gli studi, includendo il numero iniziale dei record, i criteri di selezione ed il numero finale di articoli inclusi. Per rappresentare questo processo visivamente, si utilizza il Flowchart PRISMA che definisce il processo di selezione ed inclusione degli studi, che verranno poi analizzati nel lavoro di revisione sistematica. Questo diagramma di flusso consta di quattro fasi principali:

1. *Identificazione*: in questa fase sono elencati i documenti trovati all'inizio dello studio, sono riportati i record (titolo ed abstract) identificati tramite ricerca su banche dati scientifiche (come PubMed, Scopus, Web of Science);
2. *Screening*: qui avviene la prima scrematura dei documenti in cui si rimuovono i record duplicati trovati su più database e si dividono dagli articoli effettivamente pronti per la valutazione;
3. *Eleggibilità*: vengono valutati i testi integrali degli articoli ritenuti potenzialmente validi allo step precedente. Per gli articoli esclusi, si specificano le motivazioni dell'esclusione;
4. *Inclusione*: rappresenta il risultato finale del processo che riporta il numero esatto di studi inclusi nella revisione sistematica (sintesi qualitativa) ed il numero di studi che sono stati elaborati statisticamente (sintesi quantitativa o meta-analisi).

PRISMA 2020 flow diagram for new systematic reviews which included searches of databases, registers and other sources



*Consider, if feasible to do so, reporting the number of records identified from each database or register searched (rather than the total number across all databases/registers).
 **If automation tools were used, indicate how many records were excluded by a human and how many were excluded by automation tools.

Questo diagramma è utile sia per la chiarezza espositiva sia per il controllo di qualità del reporting. Infatti, il valore delle revisioni sistematiche gioca un ruolo molto importante nel panorama scientifico perché offre un metodo rigoroso per raccogliere e valutare la considerevole quantità di conoscenze disponibili su un dato argomento. In definitiva, in un mondo in cui l'informazione è sovrabbondante, le revisioni sistematiche rappresentano il baluardo contro la disinformazione, consentendo di prendere decisioni basate su fatti certi [21].

2.3 Definizione dei Criteri di Eleggibilità

Nel metodo PRISMA, i criteri di eleggibilità rappresentano le regole stabilite a priori per definire quali studi possono essere inclusi o esclusi dalla revisione. Questi criteri, che guidano l'intera ricerca e prevengono i bias, si dividono solitamente in due categorie principali: le caratteristiche dello studio e quelle del report.

- *Caratteristiche dello studio*

Si basano su parametri scientifici che servono a garantire che gli articoli trovati rispondano esattamente al quesito di ricerca. Vengono definiti usando il modello PICO:

P - Popolazione: che identifica l'unità di analisi economica o industriale di aziende di settori e dimensioni diverse;

I – Intervento: rappresenta la metodologia di gestione o la strategia oggetto di studio;

C – Confronto: sistemi di produzione tradizionali o snelli, situazione As-Is rispetto a situazione To-Be;

O – Outcomes (Risultati): che misurano l'efficacia dell'intervento in termini di performance aziendali, operative od economiche (KPI).

- *Caratteristiche del report*

Riguardano la natura pratica e documentale degli articoli trovati nei database tra cui il disegno dello studio, la lingua (spesso si ricercano esclusivamente studi in lingua inglese), l'anno e lo stato di pubblicazione ed il setting.

Questi due tipi di caratteristiche servono per definire i criteri di inclusione ed esclusione. Il primo comprende tutte le caratteristiche necessarie che uno studio deve avere per essere selezionato. Il secondo racchiude le caratteristiche che determinano l'eliminazione automatica di uno studio in quanto non pertinente.

2.4 Strategia di Interrogazione e Raccolta dei Record

Scopus è un database di citazioni ed abstract della letteratura scientifica internazionale che mette a disposizione strumenti in grado di fare ricerche veloci, filtrare ed analizzare i risultati. Contiene più di 75 milioni di citazioni bibliografiche e dati bibliometrici. Copre una vasta gamma di settori, tra cui i principali sono il social sciences and humanities, il physical sciences, health sciences ed il life sciences. Per effettuare ricerche su Scopus è molto importante adottare strategie mirate ed impostare i requisiti di ricerca in lingua inglese perché la maggior parte dei documenti è indicizzata in questa lingua. Per affinare la ricerca ed ottenere risultati sempre più precisi, è fondamentale utilizzare i comandi booleani, scritti rigorosamente in maiuscolo, come AND per ricercare documenti che contengono entrambe le parole chiave, OR per includere documenti che contengono almeno uno dei due sinonimi e NOT che esclude determinati termini dalla ricerca. Le parole chiave inserite, inoltre, devono essere racchiuse da delle virgolette (" ") per ricercare una frase esatta. Dopo aver ottenuto la lista dei documenti, si può effettuare una scrematura degli stessi usufruendo dei filtri presenti nel menù a sinistra dello schermo. Definire l'intervallo di tempo di riferimento è di fondamentale importanza, non a caso vengono selezionati articoli pubblicati negli ultimi anni perché la ricerca evolve molto velocemente, si specifica l'area disciplinare di maggior interesse per evitare di ottenere risultati fuori contesto. Infine, si può scegliere se visualizzare solamente articoli di riviste oppure anche atti di convegno e capitoli di libri. Per ogni articolo ricercato, Scopus riporta anche gli autori, le fonti ed eventuali documenti che hanno citato un determinato articolo [22].

CAPITOLO 3: ANALISI DELLA LETTERATURA ED EVOLUZIONE DEI MODELLI DI VALUE STREAM MAPPING NELL'ERA 4.0 E 5.0

3.1 Innovazione ed evoluzione digitale nella Lean Manufacturing

Il seguente capitolo si propone di esaminare in modo critico la letteratura scientifica riguardante l'evoluzione degli strumenti della *Lean Manufacturing*, focalizzandosi principalmente sulla *Value Stream Mapping*. Questo strumento, però, presenta dei limiti per quanto riguarda la sua applicazione all'interno di contesti produttivi caratterizzati da una domanda molto flessibile e dinamica perché la natura di questo strumento è statica, basata ancora su carta e su rilevazioni manuali asincrone. Per superare queste barriere, all'interno di questo capitolo verrà illustrato come l'integrazione delle tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 e dell'Industria 5.0 consenta di potenziare la filosofia *Lean* da un punto di vista digitale e metodologico.

Al fine di offrire una trattazione esplicativa e lineare, i vari articoli selezionati sono stati suddivisi per macro-aree tematiche principali, che riflettono le tendenze su cui si basa l'innovazione industriale:

- *Digitalizzazione e monitoraggio real-time*: si approfondiscono quelle soluzioni che consentono la transizione da dati statici a flussi informativi continui ed automatizzati. Tipici di questo campo sono i framework basati sui Gemelli Digitali (i cosiddetti DTVSM) per identificare anticipatamente eventuali anomalie. Sono presenti anche le bacheche Kanban centralizzate e digitali con architetture open-source e Sistemi di Posizionamento Indoor (IPS) utilizzati insieme al *process mining* per la mappatura degli sprechi nascosti all'interno delle attività e flussi logistici e di trasporto;
- *Sostenibilità integrata e modelli multidimensionali*: in cui si oltrepassano i classici confini della filosofia *Lean*. Gli strumenti di maggior utilizzo previsti in questa fase sono i modelli multistrato e multivariabile (MLMV-VSM) in grado di mappare e tenere traccia delle performance operative, dell'impatto ecologico e del benessere sociale dei lavoratori, considerando anche determinati parametri critici come il rischio ergonomico e lo stress cognitivo in ottica Industria 5.0;

- *Simulazione avanzata ed ottimizzazione dei processi*: verranno sperimentati l'utilizzo di approcci di Hybrid Simulation (Simulazione Ibrida), che abbinano la DES (Simulazione ad Eventi Discreti) con la modellazione basata su agenti (ABMS), ed il ciclo DMAIC di Six Sigma integrato con algoritmi decisionali multicriterio, che permettono di eliminare i colli di bottiglia, ottimizzare il bilanciamento delle linee produttive e ridurre i tempi di consegna ancor prima della reale implementazione fisica.

La parte conclusiva del capitolo presenterà un confronto critico tra i vari approcci per mettere in luce il compromesso tra la complessità di implementazione ed i benefici ottenuti, per definire una tavola di benchmarking precisa che guidi i manager nella scelta della traiettoria di digitalizzazione snella che più si confà alle diverse esigenze aziendali.

3.2 Digitalizzazione e monitoraggio real-time

L'articolo *"Digital workshop health status evaluation method based on DTVSM"* propone un metodo innovativo che concerne la gestione dello stato di salute (*Health Management*) dei sistemi di produzione industriali basati sull'Industria 4.0. La ricerca si basa principalmente nel superamento dei limiti della tradizionale Value Stream Mapping, strumento che non si adatta pienamente ai moderni e dinamici ambienti produttivi. Per oltrepassare questo problema, gli autori del presente articolo hanno introdotto il concetto di DTVSM (*Digital Twin Value Stream Model*), che è un modello del flusso di valore basato sulla tecnologia del gemello digitale (*Digital Twin*). Il problema principale del VSM tradizionale è legato al modo statico di fotografare la fabbrica, concentrandosi quasi esclusivamente sui tempi e non tenendo conto della qualità e dei consumi energetici, impedendo così di effettuare controlli tempestivi. Per cui, l'impiego del DTVSM permette di utilizzare dati in tempo reale, favorendo la simulazione e l'interazione tra fisico e virtuale. Questo strumento è in grado di creare un ciclo di gestione organizzato in tre fasi:

- Monitoraggio: i dati raccolti in tempo reale tengono traccia delle risorse in maniera continua;

- Diagnosi: permette di identificare preventivamente le anomalie rispetto a dei parametri di riferimento calcolati dinamicamente;
- Regolamentazione: i comandi correttivi vengono inviati direttamente ai sistemi di fabbrica per risolvere i problemi.

Il DTVSM è composto da tre sottomodelli specifici, quali il C-VSM, il P-VSM ed il D-VSM. Il C-VSM (*Cyber Value Stream Model*) è incentrato sulla simulazione ad eventi discreti (DES), consente di fare un'anteprima della produzione che serve a stabilire determinati parametri standard di salute e i pesi degli indicatori. Il P-VSM (*Physical Value Stream Model*) crea una mappa del sistema fisico in tempo reale, acquisendo i dati sul campo e rilevando i disturbi operativi. Infine, il D-VSM (*Deviation Value Stream Model*) tiene conto della deviazione tra il comportamento reale e quello ideale, quantificando lo stato di salute ed attivando allarmi. L'articolo fornisce un sistema di indicatori gerarchico basato sulle normative ISO 22400 focalizzato sugli aspetti di qualità ed efficienza. Questo sistema è suddiviso in stazioni o postazioni di lavoro che valutano parametri come l'OEE (Overall Equipment Effectiveness), il tasso di qualità (GQR) ed il rendimento di primo passaggio (FPY), in linee di produzione che accorpano i dati delle stazioni e misurano il bilanciamento (LBR) e la qualità della linea (FQR) ed in officine che riportano un indice scalare che racchiude le prestazioni di tutta la fabbrica. È stato introdotto, in aggiunta, lo standard IEC 61499 che rende il modello riutilizzabile in varie fabbriche scomponendo il flusso di valore in componenti di risorse che possono essere riutilizzate e standardizzate, comunicando tra loro tramite flussi di dati ed eventi. Questa metodologia è stata sperimentata su un sistema di produzione flessibile volto alla didattica SL-IFMS formato da 6 stazioni di lavorazione, 3 di preassemblaggio e 1 di assemblaggio finale. Successivamente, vengono inseriti di proposito 5 diverse tipologie di disturbi, sia espliciti come guasti improvvisi che impliciti quali il degrado progressivo della qualità dei materiali. I risultati dei test hanno confermato l'enorme efficacia del sistema raggiungendo un tasso di rilevamento totale delle anomalie del 95,45%, individuando precisamente la posizione del guasto nel 96,19% dei casi, una latenza molto bassa con tempi di risposta inferiori agli 8 secondi per quanto concerne i guasti espliciti ed il tasso dei falsi allarmi è stato quasi azzerato, avendo un valore di 0,018%,

usando dei limiti di tolleranza che si aggiornano e si adattano in maniera dinamica alla variabilità della fabbrica. Di contro, gli autori hanno individuato alcune aree da migliorare per il prossimo futuro che riguardano: scenari complessi in cui andare a testare il modello in contesti con un'alta varietà di prodotti su larga scala e non solamente in ambienti controllati; disturbi simultanei, ovvero legati al sovrapporsi di vari disturbi contemporaneamente come spesso accade nelle fabbriche reali; evoluzione tecnologica integrando grafi di conoscenza e Modelli Linguistici di Grandi Dimensioni (LLM) garantendo una diagnosi assistita e interattiva tra l'uomo e la macchina; architettura Cloud-Edge differenziando tra i servizi che richiedono delle risposte repentine con latenza minima che vengono elaborati a bordo macchina (l'Edge) ed analisi a lungo termine che verranno trasferite sul Cloud [23].

L'articolo ***"The formulation and implementation of Kanban 4.0 for integrated lean digitalized industrial systems"*** affronta l'utilizzo e lo sviluppo di una Central Digital Kanban Board, una soluzione architettata per integrare le tecnologie dell'Industria 4.0 con i principi della Lean Manufacturing, il cui obiettivo principale è quello di avvalersi di sistemi digitali accessibili in tempo reale per superare i limiti degli strumenti cartacei Lean. L'articolo evidenzia come il settore industriale sia fortemente carente dal punto di vista dei framework che siano in grado di digitalizzare gli strumenti Lean senza creare sprechi digitali. Questi sistemi sono limitati dall'utilizzo di kanban fisici che potrebbero andare persi e che richiederebbero uno sforzo manuale non indifferente. Le VSM statiche e la mancata integrazione, inoltre, non permetterebbero di reagire in maniera tempestiva ad eventuali variazioni della domanda o colli di bottiglia, anche perché i software aziendali non comunicano direttamente con gli strumenti Lean presenti in officina. Per cui, è stata ideata una piattaforma web che elabora i dati trasformando le icone tipiche della VSM, come kanban o supermercati, in pulsanti digitali interattivi ubicati su schermi presenti lungo la linea produttiva. Questo sistema è stato realizzato usufruendo di un'infrastruttura cloud e strumenti open-source, in particolar modo il frontend è stato possibile svilupparlo con HTML5 e JavaScript creando interfacce grafiche scansionabili e reattive, il tutto è poi ospitato sulla piattaforma Vercel. Il backend e il database sono basati su Supabase e la comunicazione tra l'interfaccia ed il

database avviene tramite chiamate di procedura remota (RPC), aggiornando il database ad ogni pressione di un pulsante in fabbrica. Nello specifico, ogni processo produttivo si avvale di determinati pulsanti associati a stringhe di ID numerici, come: il Production Kanban, che attiva la richiesta di produzione specificando la quantità da un menu a tendina e generando un ID intero con stato “aperto”; il Supermarket, pulsante premuto per dichiarare quanti pezzi conformi l’operatore ha depositato nello stock temporaneo e viene generato un ID decimale collegato. Nel caso in cui la quantità prodotta sia inferiore alla richiesta, viene attivato in maniera automatica un nuovo kanban di produzione per la parte mancante; il Withdrawal Kanban, in cui il processo a valle preleva solamente i pezzi conformi dal supermarket e cambia lo stato dei record precedenti da “aperto” ad “elaborato”, viene calcolato anche il tempo di consegna tra la richiesta iniziale ed il prelievo; il Machine Stoppage, che gestisce il sistema di allarme guasti, viene individuato il tipo di guasto da un menu a tendina ed il sistema calcola la durata precisa del fermo macchina; la fase finale è la spedizione, che utilizza pulsanti per gestire l’ordine del cliente e tenere conto dei turni e delle pause degli operatori. Una volta raccolti i dati, la bacheca mostra due cruscotti principali: il Dashboard OEE e la VSM Digitale. Il primo misura la produttività confrontando disponibilità, prestazioni e tasso di qualità. Vengono introdotti sia calcoli per le singole macchine sia l’OEE integrato che riguarda l’intero sistema in serie, avvalendosi di grafici con colori diversi per valutare l’efficienza: il rosso (<40%) indica un’efficienza molto bassa, il giallo (40% - 59.9%) richiede miglioramenti, l’arancione (60% - 84.9%) per un livello accettabile e il verde (>85%) per un’efficienza di livello mondiale. La VSM Digitale, invece, si aggiorna automaticamente sullo schermo calcolando il tempo di ciclo per ogni macchina, il Takt Time (TT) che dipende dalla domanda del cliente, i tempi medi di inventario nei supermercati, il Production Lead Time (PLT) ed il Value-Added Time (VAT) in cui il prodotto riceve valore effettivo. Una volta terminato il turno, questo insieme di dati viene raccolto e salvato in specifiche tabelle del database, azzerando i cruscotti per il turno successivo. Il caso di studio di questo articolo riguarda una mini-fabbrica farmaceutica che si occupa della produzione di compresse attraverso un processo organizzato in 9 fasi sequenziali: pesatura, granulazione, essiccazione, macinazione,

miscelazione, compressione, rivestimento, confezionamento e spedizione. I lotti di produzione possono essere di 2500, 3750 o 5000 compresse con tempi di ciclo ideali per ogni macchina e ottenendo dei parametri matematici che dimostrano la perfetta corrispondenza tra le movimentazioni reali della fabbrica ed i dati registrati nei log del database. La ricerca dimostra come la *Central Digital Kanban Board* scambia informazioni con i moduli base di un sistema ERP aziendale in modo bidirezionale pianificando la produzione e calendarizzando correttamente i lotti incentrandosi su dati come l'OEE, i tempi di ciclo e i fermi macchina, gestendo la qualità in base ai tassi di difettosità per capirne le cause profonde, controllando costantemente i consumi del *Production Kanban* e le scorte nei supermercati per riordinare le materie prime secondo l'ottica Just-In-Time (JIT), calcolando precisamente i costi unitari di produzione e monitorando sia la produttività della manodopera in base a turni e pause sia i flussi logistici di input/output. In conclusione, l'articolo afferma che è possibile trasformare digitalmente un'azienda diminuendo gli investimenti in hardware costosi e garantendo alle aziende stesse una visione olistica e chiara dei processi industriali [24].

Un'altra innovazione del settore riguarda l'applicazione ed i risultati di un modello di Mappatura Intelligente del Flusso di Valore (IVSM, Intelligent Value Stream Model) abilitato dall'IoT ed integrato con un Sistema Integrato di Monitoraggio dell'Efficienza (IEMS) come descrive l'articolo intitolato ***"Intelligent VSM Model: a way to adopt Industry 4.0 technologies in manufacturing industry"***. Le industrie manifatturiere operano in un mercato caratterizzato da alta competitività e dinamicità, utilizzando la VSM che è uno strumento derivato dal sistema di produzione Toyota per identificare ed eliminare gli sprechi ed attività che non aggiungono valore. Per risolvere la problematica legata alla difficoltà di mappare flussi complessi con più prodotti e domande dei clienti fluttuanti, l'articolo presenta la tecnologia dell'IVSM che unisce i principi della Lean Manufacturing, le tecnologie dell'Industria 4.0 e la Teoria dei Vincoli (TOC). Il primo passo da compiere è quello dell'acquisizione dati dall'officina attraverso quattro sistemi integrati nelle macchine, come sensori per misurare i tempi di inattività, interfacce uomo-macchine (HMI) che visualizza gli input di richiesta e registra i tassi di scarto che l'operatore inserisce, le lampade a torre contribuiscono a tener conto dei prodotti

difettosi e gli interblocchi delle macchine per misurare i tempi di ciclo e di inattività. Questi dati vengono, successivamente, inviati ad un modulo TOC che individua immediatamente il macchinario “collo di bottiglia”, rallentando così la linea produttiva. Una volta che i dati sono stati archiviati su un server cloud, il sistema di monitoraggio elabora la cronologia e, tramite un algoritmo di rete neurale artificiale, la dashboard del manager viene aggiornata secondo intervalli regolari definiti, trasmettendo allarmi automatici in caso di fermi macchina per scongiurare il verificarsi di tempi di inattività troppo lunghi. Affinché venga valutata l'efficacia del trasferimento delle informazioni aziendali, è stato introdotto un sistema di punteggio da 1 a 5 in cui un punteggio pari a 5 corrisponde ad una comunicazione cartacea tramite i dipendenti, poco desiderabile, mentre un punteggio pari ad 1 indica una comunicazione automatizzata che avviene tramite software garantendo una maggiore efficacia e robustezza delle informazioni aziendali. Questo modello è stato applicato sperimentalmente presso la XYZ, un'azienda produttrice di componenti elettromeccaniche per autoveicoli nel Tamil Nadu in India. Questa linea produttiva è composta da 10 fasi poste in sequenza: pre-stampaggio (P1), taglio (P2), test C (P3), stampaggio superiore (P4), controllo G (P5), test H (P6), test L (P7), ispezione finale (P8), imballaggio (P9) e spedizione (P10). Dalla mappatura dello stato attuale tramite IVSM, si è notato che il processo di stampaggio superiore (P4) risultava essere il collo di bottiglia principale che determinava il ritmo dell'intera linea ed aumentava i tempi di rilevamento dei difetti (es. 146 ore per PPC1) mentre l'efficienza totale del ciclo di processo iniziale era pari solamente allo 0,18%. Le azioni di miglioramento per bilanciare la linea prevedono la riprogettazione del layout implementando le attività kaizen e creando tre cicli pacemaker:

- Ciclo 1: nel quale vengono combinati insieme i processi di taglio (P2) e test C (P3) per allinearli alla macchina di produzione di preformatura (P1), in questa maniera è stato possibile eliminare un operatore e ridurre il tempo di ciclo;
- Ciclo 2: l'operatore dello stampaggio superiore (P4) deve svolgere anche l'operazione di rimozione delle bave (o canali di colata) sfruttando il tempo morto della macchina. Inoltre, per gestire in maniera ottimale la fase di

polimerizzazione e mantenere il flusso bilanciato, è stato necessario creare un “supermercato” (o buffer) della durata di 4 ore;

- Ciclo 3: prevede l'introduzione e l'utilizzo di robot pick-and-place per automatizzare la fase di carico e scarico manuale dei banchi di prova, riducendo di 4 secondi il tempo di ciclo per ogni pezzo ed eliminando manodopera, perseguendo l'obiettivo di ottenere una linea produttiva senza operatori (la cosiddetta “fabbrica digitale”).

Prima della spedizione, infine, è stato conveniente introdurre un supermercato per gestire i prelievi del cliente in ottica Pull mediante cartellini kanban. Il modello IVSM applicato ha mostrato notevoli miglioramenti nelle prestazioni generali della fabbrica: il Lead Time è stato ridotto da 35,5 a 24 giorni; si è registrato un netto miglioramento dell'efficienza del ciclo di processo in linea con gli standard della Lean, passando dallo 0,18% all'1,17%; la raccolta automatica dei dati IoT ha permesso di ridurre il tempo necessario di verifica dei risultati dei cicli di miglioramento PCDA (Plan-Do-Check-Act) da 30 ore a solo 1 ora; il tempo di rilevamento dei difetti (PPC) è stato ridotto in maniera consistente, in particolare per PPC è passato da 146 ore a 1 sola ora (e a frazioni di ora per gli altri PPC); i sistemi di allarme automatici hanno favorito la riduzione dei tempi di inattività di circa l'8% della disponibilità, migliorando anche il tempo medio di riparazione (MTTR); infine, si è ottimizzato l'utilizzo delle risorse avvalendosi di solamente 5 addetti per implementare il modello e raggiungendo un'efficienza produttiva del 96%. In conclusione, dopo aver constatato l'efficacia di questo metodo nella previsione delle incertezze di produzione, gli autori hanno individuato una vulnerabilità nel sistema. Non a caso, questo modello può essere soggetto ad attacchi informatici esterni o a problemi legati alla sicurezza dei dati se non si dispone di metodi di controllo adeguati nella logica degli algoritmi e senza una standardizzazione corretta. Nel prossimo futuro, la ricerca sarà incentrata sull'estensione di questa struttura integrando metriche di sostenibilità come la Green VSM, applicandola a sistemi globali di produzione per prevedere in anticipo le condizioni critiche [25].

Un'evoluzione metodologica della tradizionale VSM è la VSM 4.0 Plus, il cui funzionamento viene descritto nell'articolo “*Extension of value stream mapping 4.0 for*

comprehensive identification of data and information flows within the manufacturing domain” ed è uno strumento pensato per favorire la transizione aziendale verso l’Industria 4.0 e l’Industrial Internet of Things (IIoT). La ricerca si pone come obiettivo quello di ideare uno strumento standardizzato che gli ingegneri di produzione e gli sviluppatori di software possono utilizzare per mappare non solo i flussi fisici di materiali, ma anche e soprattutto i flussi logici e tecnici dei dati interni di una realtà industriale. In un contesto industriale incentrato sull’Industria 4.0, i dati e le informazioni sono il fattore chiave per prendere decisioni rapide e creare sistemi produttivi resilienti. È necessario comprendere a fondo l’infrastruttura informatica e tecnologica della fabbrica per raccogliere dati in modo efficiente. Un primo tentativo di integrare la Lean Manufacturing e la digitalizzazione risale al 2016 con l’introduzione del metodo VSM 4.0 che presenta, comunque, carenze non indifferenti come l’assenza di informazioni riguardanti i protocolli di comunicazione che le macchine utilizzano, la mancanza della crittografia per la sicurezza dei dati e la poca attenzione ai vincoli legati all’infrastruttura hardware e di rete. Per queste ragioni, all’interno di questo articolo è stato proposto il framework VSM 4.0 Plus che introduce una serie di parametri tecnici dettagliati che migliorano la mappatura tradizionale e che sono suddivisi in tre grandi macro-aree:

- Specifiche del punto dati: questo metodo specifica per ogni dato la frequenza di registrazione con la quale vengono letti i dati stessi, l’unità di misura ed il tipo di dato, le informazioni che spiegano cosa quel dato rappresenta;
- Informazioni tecniche e di protocollo: si definisce il livello di comunicazione tra i vari macchinari e i sistemi centrali in base al tipo di connessione fisica o logica, al linguaggio software utilizzato per scambiare dati ed alla presenza di sistemi di crittografia o credenziali di autenticazione per difendere le informazioni da attacchi informatici esterni.
- Infrastruttura meccanica, di processo e informatica: si analizza il flusso di valore in modo olistico tenendo conto dei vincoli e delle capacità dell’ambiente di produzione, delle capacità reali dell’infrastruttura di rete e dei server di back-end presenti in azienda, evitando di richiedere hardware non sostenibili.

Per constatare l'efficacia di questa metodologia, è stata condotta una sperimentazione incentrata principalmente su realtà industriali caratterizzati da Piccole e Medie Imprese (PMI), affrontando un caso di studio specifico relativo ad un impianto di formatura dei metalli. Dalla sua applicazione, si è potuto dimostrare che questo metodo ha permesso di raggiungere pienamente gli obiettivi prefissati garantendo un ponte comunicativo tra gli ingegneri di produzione che lavorano sulle macchine e gli ingegneri informatici, abbassando notevolmente i tempi di definizione dei dati. È stato possibile mappare e individuare preventivamente i colli di bottiglia ed i limiti tecnici prima ancora che venissero installati sensori e software nuovi e costosi all'interno dell'infrastruttura di rete. Durante i test pratici si è notato che questo è un metodo molto dettagliato, per cui è molto complicata la sua applicazione per le micro imprese. In aggiunta, il team di lavoro che usufruisce di questo strumento deve essere composto da utenti che abbiano conoscenze interdisciplinari e specialistiche (come nel settore della meccanica o dell'automazione) solide. Per cui, vista la complessità legata all'utilizzo di questo strumento, gli autori consigliano di strutturare preventivamente un piano di formazione del personale aziendale affinché si possa applicare questo framework in maniera corretta. Le sfide da affrontare in futuro il modo di gestire la portata di questo strumento per renderlo utilizzabile anche in sistemi produttivi più complessi di aziende di grandi dimensioni e sviluppare delle soluzioni che semplifichino l'applicazione di questa metodologia facilitando l'ingresso per le realtà industriali più piccole e meno organizzate da un punto di vista informatico [26].

Nelle piccole e medie imprese può essere impiegato un altro strumento pratico che consente la loro transizione tecnologica, prevedendo l'impatto dei cambiamenti digitali. In relazione a questo, l'articolo intitolato ***“Extending the lean value stream mapping to the context of Industry 4.0: An agent-based technology approach”*** descrive lo sviluppo dell'Hybrid Simulation – Value Stream Mapping (HS-VSM) in cui è presente la simulazione ibrida (HS) che combina la simulazione ad eventi discreti (DES) e la modellazione basata su agenti (ABMS). Nonostante l'impatto positivo sulle performance aziendali derivato dalla combinazione della Lean Manufacturing e dell'Industria 4.0, gli autori evidenziano alcune limitazioni legate alla mancanza di strumenti per le PMI, che

dispongono di meno risorse finanziarie e competenze se confrontate con le imprese più grandi e necessitano anche di progetti incrementali a breve termine. Inoltre, mancano delle linee guida che utilizzino la simulazione ibrida tra DES e ABMS per rappresentare le tecnologie e l'autonomia dei componenti digitali. La ricerca propone di accoppiare la staticità del VSM con l'hybrid simulation avvalendosi della simulazione ad eventi discreti (DES) per modellare i flussi fisici sequenziali di materiali, le code e i tempi di lavorazione delle macchine, mentre la modellazione basata su agenti (ABMS) consente di rappresentare entità decentralizzate ed interconnesse (come sensori IoT e sistemi ciberfisici CPS) che interagiscono tra loro e con l'ambiente. Viene perseguita la metodologia della Design Science Research (DSR), un paradigma che è stato ideato per validare nuovi artefatti tecnologici volti alla soluzione di problemi reali. Le tre fasi che questo approccio prevede riguardano: la VSM dello stato attuale, ottenuto mappando graficamente il flusso di fabbrica raccogliendo i dati di processo come numero di operatori, tempi di ciclo e tempi di setup; la modellazione e simulazione dello stato attuale, fase nella quale i dati raccolti precedentemente vengono utilizzati dal software per creare il modello di simulazione ibrido ed è importante che sia validato dagli esperti dell'azienda per riflettere in maniera fedele il comportamento reale del sistema; la progettazione e simulazione dello stato futuro, in cui è possibile simulare scenari virtuali, come linee automatizzate o supporto digitale agli operatori, grazie all'applicazione dei principi Lean e dell'Industria 4.0. Questo framework è stato applicato e sperimentato tramite un'applicazione pilota in una PMI manifatturiera del Quebec, Canada, che realizza e produce mobili sia per uso residenziale che commerciale. L'azienda aveva ricevuto di recente un finanziamento dal governo per incrementare la propria competitività per consentire, tra l'altro, il verificarsi di un percorso di transizione digitale. In aggiunta, l'applicazione dell'HS-VSM ha confermato come questo strumento sia in grado di supportare la creazione di una mappatura strategica per l'Industria 4.0 e assistere il personale aziendale nella comprensione dettagliata dei cambiamenti nei flussi di materiali, attrezzature e informazioni dovuti all'introduzione delle nuove tecnologie digitali. Si può constatare, in conclusione, che l'utilizzo congiunto della VSM e della simulazione ibrida offra alle PMI uno strumento decisionale che interessa sia gli

ingegneri di produzione che gli sviluppatori software. Per quanto concerne gli sviluppi futuri, gli autori suggeriscono di generalizzare la validità di questo strumento applicandolo a settori industriali diversi e a casi aziendali più complessi. Importante è anche l'integrazione nel sistema di tecnologie di Intelligenza Artificiale per elaborare automaticamente i dati di input della simulazione o per analizzare i comportamenti intelligenti dei componenti dell'Industria 4.0. Infine, questa metodologia può essere utilizzata per sviluppare una libreria software di blocchi VSM integrati all'interno di piattaforme di simulazione, tra cui una delle più conosciute e diffuse sul mercato è il software *AnyLogic* [27].

All'interno del contesto dell'Industria 4.0 si può applicare anche un approccio decisionale multicriterio (MCDM) classificando i diversi strumenti della Lean Manufacturing integrati con i Sistemi Cyber-Fisici (CPS). L'articolo "***Benchmarking analysis of cyber-physical system-based lean tools using grey approaches***" specifica come i sistemi cyber-fisici costituiscano il primo passo fondamentale implementare l'Industria 4.0 avendo come obiettivi principali l'eliminazione sistematica degli sprechi, la creazione di valore e l'ottimizzazione dei processi. In aggiunta, le aziende e le PMI in particolar modo necessitano di studi che permettano ai manager di selezionare le tecnologie integrate che risultino le più efficaci per il raggiungimento degli obiettivi. La revisione della letteratura ed il consulto con esperti del settore industriale ha consentito di individuare 6 strumenti Lean integrati con CPS, i quali sono:

- Sistema Jidoka basato su CPS: si utilizzano intelligenti sensori automatizzati per correggere autonomamente gli errori dei macchinari;
- Kanban 4.0: in cui la gestione dei materiali viene tracciata digitalmente con tecnologie quali l'RFID e i codici a barre;
- Sistema di supporto Andon 4.0: che è un insieme di indicatori visivi dello stato dei macchinari potenziato dall'IoT per il controllo a breve termine;
- Value Stream Mapping basata su CPS: gli sprechi sono identificati in modo autonomo grazie alla mappatura sistematica e digitale dei flussi di materiali e di informazioni in real time;

- Cella Poka-Yoke 4.0: vengono impiegati sistemi anti-errore assistiti da tecnologie digitali, come la realtà aumentata, per la prevenzione dei difetti;
- Sistema di consegna JIT basato su CPS: viene ottimizzata la sincronia tra uomo, macchina e materiali nel posto e nel momento giusto mediante tracciamento digitale.

Sono stati definiti dagli autori 7 criteri di performance per valutare questi 6 strumenti, che sono:

- Il livello di digitalizzazione dei processi;
- La capacità di personalizzare ed adattare i prodotti alle richieste dei clienti;
- L'interoperabilità delle macchine, capaci di comunicare e connettersi tra loro;
- La produzione sincrona, allineando materie prime e domanda di mercato con l'ottica di azzerare la sovrapproduzione;
- La produttività e l'efficienza legata all'utilizzo di risorse, manodopera e macchinari;
- La flessibilità del sistema nel riconfigurarsi e riadattarsi repentinamente nel caso di variabilità della domanda del mercato o guasti;
- Il rispetto dell'ambiente e la sostenibilità.

In questo articolo è stata utilizzata la teoria dei sistemi Grey dato che i dati tipici di un sistema industriale risultano essere vaghi o incompleti, specialmente nelle fasi iniziali della transizione digitale. I giudizi linguistici individuati da un gruppo di manager del settore automobilistico sono stati combinati con il metodo Grey TOPSIS, un modello matematico decisionale multicriterio, e questi risultati sono stati convalidati da un algoritmo basato sulla teoria Grey per garantirne l'assoluta coerenza. Dopo aver analizzato matematicamente i dati ed i punteggi di performance (P_i), è stato possibile creare una tabella che indica la classifica di priorità per l'integrazione con i CPS:

Posizione	Strumento Lean basato su CPS	Punteggio (Pi)	Descrizione dell'impatto riscontrato PDF
1°	Kanban 4.0	0.765	È lo strumento più pronto e facile da integrare (es. usando tag RFID per monitorare e rifornire l'inventario in tempo reale).
2°	Value Stream Mapping 4.0	0.653	Offre un enorme potenziale per pianificare le attività e allocare le risorse raccogliendo dati termici ed energetici dai macchinari.
3°	Just-In-Time 4.0	0.616	Consente il monitoraggio immediato delle giacenze, riducendo drasticamente i costi di stoccaggio.
4°	Poka-Yoke cell	0.413	Utile per l'azzeramento degli errori a basso costo su linee di produzione cellulare.
5°	Andon support system	0.287	Monitoraggio visivo e decentralizzato dello stabilimento.
6°	Jidoka system	0.175	All'ultimo posto perché la sua digitalizzazione è un processo altamente complesso che richiede personale ultra-specializzato.

Da questa “tabella di marcia” fornita dallo studio, risulta chiaro che i manager dovrebbero focalizzarsi principalmente su Kanban, VSM e JIT digitali anziché investire su eccessive tecnologie contemporaneamente. L’impiego mirato di questi strumenti 4.0 migliora il processo decisionale basato sui dati, ottimizza i consumi energetici, rispettando anche il fattore ambientale con soluzioni sostenibili e riducendo i costi. Questo studio specifica che gli studi futuri si concentreranno sull’implementazione di questi modelli in altri settori manifatturieri e non solamente nell’ambito della

componentistica automobilistica, individuando gli ostacoli in cui le aziende incorrono durante l'installazione delle infrastrutture dell'Industria 4.0 [28].

Un'ulteriore tecnologia molto utilizzata nell'ambito della Lean Manufacturing è l'Intelligenza Artificiale, con un focus particolare sull'uso delle reti neurali convoluzionali (CNN), come illustra l'articolo ***“Improving operations through a lean AI paradigm: a view to an AI-aided lean manufacturing via versatile convolutional neural network”***.

Questa ricerca ha come scopo quello di dimostrare come l'IA e il Machine Learning automatizzino e potenzino gli strumenti classici della produzione snella. Il potenziale di quest'innovazione risiede nel concetto di *“data flywheel”*, ovvero disporre di una maggiore quantità di dati consente di sviluppare algoritmi sempre migliori, creando prodotti superiori che attirano un numero maggiore di utenti. Questi ultimi alimentano un ciclo continuo di apprendimento, generando nuovi dati e rendendo possibile un miglioramento autonomo in linea con l'etica Lean del Kaizen. Il saggio è stato delineato e suddiviso in sezioni principali: automazione intelligente, evolvendo dall'automazione tradizionale a quella intelligente, in grado di prendere decisioni smart ed aumentare l'efficacia operativa; i pilastri dell'IA moderna, che sono potenza computazionale, disponibilità dei dati ed evoluzione degli algoritmi; integrazione Lean-IA, riguardante l'impatto dell'IA su tutti i singoli strumenti della produzione snella; Reti Neurali Convoluzionali (CNN) per la Computer Vision; casi di studio con sette diversi casi di applicazione delle CNN in differenti aree delle operazioni aziendali; opportunità, sfide e trend futuri analizzando i rischi legati alla qualità dei dati e le prospettive del futuro che riguardano anche l'integrazione dei computer quantistici. Viene descritta minuziosamente anche l'applicazione degli algoritmi dell'Intelligenza Artificiale per ottimizzare quelli che sono i pilastri su cui si poggia la Lean Manufacturing. Si possono trovare:

- I 5 principi Lean, che sono valore, mappatura, flusso, pull e perfezione. I feedback dei clienti vengono analizzati grazie all'elaborazione del linguaggio naturale (NLP) per definirne il valore, poi viene mappata la catena del valore tramite il clustering. Successivamente, l'ottimizzazione dei flussi di lavoro e

la logistica Just-In-Time riducono la sovrapproduzione in base alla domanda reale tramite i modelli predittivi e il Reinforcement Learning (LR);

- Riduzione degli sprechi, che sono di tre tipologie. Vi sono i *Muda*, ovvero gli sprechi materiali, che vengono identificati in tempo reale dalla Computer Vision tramite CNN. I *Mura*, invece, indicano irregolarità e disomogeneità nel flusso di lavoro e dei modelli di serie temporali migliorano le previsioni della domanda rendendo la produzione più stabile. Infine, i *Muri* rappresentano il sovraccarico, utilizzando l'IA per ottimizzare l'allocazione delle risorse e riducendo anche lo stress di operatori e macchinari;
- Il metodo 6S comprende le fasi di Sort, Set in order, Shine, Standardize, Sustain e Safety. Le reti neurali convoluzionali consentono l'identificazione degli strumenti necessari e le aree disordinate o poco sicure mentre per garantire che gli standard siano mantenuti nel tempo ci si avvale di algoritmi di *Anomaly Detection*;
- Manutenzione Produttiva Totale (TPM). L'IA possiede delle strategie di manutenzione predittiva e prescrittiva, in questa maniera è possibile anticipare eventuali guasti ai macchinari e ridurre i tempi di fermo macchina, migliorando, di conseguenza, anche l'OEE;
- Poka-Yoke e Jikoda, strumenti che, non appena rilevano un'anomalia, interrompono la linea produttiva o avvertono immediatamente gli operatori tramite algoritmi di classificazione e visione artificiale;
- DMAIC, che racchiude le fasi di Define, Measure, Analyze, Improve e Control. L'Intelligenza Artificiale velocizza questo approccio controllando una serie di parametri industriali in tempo reale ed eseguendo simulazioni che permettano di trovare le soluzioni più efficaci.

I modelli CNN sono stati applicati all'interno delle moderne fabbriche digitali, nelle quali la cybersecurity è fondamentale per garantire la stabilità operativa. All'interno del presente articolo la CNN risulta personalizzata tramite l'integrazione di livelli convoluzionali 1D, LSTM e meccanismi di attenzione sul dataset TON_IoT, che raccoglie i dati relativi ad attacchi informatici indirizzati a 7 dispositivi industriali (come dispositivi

Modbus, porte di garage, sensori di frigoriferi e tracker GPS). Il risultato di questo caso di studio del CNN sviluppato dagli autori mostra straordinarie prestazioni per quanto riguarda l'accuratezza e la precisione (ad esempio, sul dispositivo Modbus era del 99,94% e del 99,78% sul sensore della porta del garage), diminuendo i tempi di risposta agli attacchi a pochi secondi e minimizzando lo spreco di tempo e risorse dovuto ai fermi di rete [29].

L'articolo finale di questa macro area, dal titolo ***"Indoor positioning systems can revolutionise digital lean"***, pone il focus della ricerca sull'utilizzo dei *Sistemi di Posizionamento Indoor* (IPS, che corrisponde ad un GPS per ambienti chiusi) impiegato insieme a tecniche di process mining per mappare i processi in modo automatizzato e identificare gli sprechi dei sistemi di produzione flessibili in tempo reale. Nelle industrie moderne, i sistemi di produzione flessibili rendono difficile monitorare i flussi e controllare le scorte interne, rispetto alle classiche catene di montaggio a nastro trasportatore. Storicamente, si mappavano i flussi e si evidenziavano gli sprechi limitandosi ad osservare visivamente e facendo misurazioni manuali, impiegando molto tempo e lavoro. Gli autori dell'articolo propongono un sistema IPS innovativo che misura automaticamente sprechi, tempi di attività e scorte eliminando l'eventualità di un possibile errore umano e garantendo la fornitura di dati precisi in tempo reale. L'Indoor Positioning System è una tecnologia wireless di posizionamento utile per tenere traccia di unità mobili, che possono essere persone o pallet, che sono dotate di particolari chip nella loro struttura che inviano segnali a dei riferimenti fissi, chiamati antenne. I vantaggi che l'IPS offre rispetto ai sistemi RFID classici riguardano l'adattamento automatico ai cambi di layout della fabbrica permettendo di escludere l'errore umano e creando automaticamente gli Spaghetti Diagram automatici per visualizzare i reali flussi di materiali. Tuttavia, questi sensori, oltre a riferire la posizione di un determinato oggetto, non sono in grado di specificare cosa stia effettivamente accadendo. Per cui, si è sentita l'esigenza di integrare l'IPS con i dati del sistema informatico MES (Manufacturing Execution System). Il framework che lo studio propone è basato sull'acquisizione dati di posizione IPS, registri delle macchine, scanner dei codici a barre e dispositivi che possono essere indossati. Vengono fornite informazioni riguardanti la planimetria della fabbrica

e delle aree designate, come le aree di attesa e le scorte tampone. Inoltre, al Process Mining sono associati specifici algoritmi che analizzano i timestamp ed i movimenti che consentono, così, di calcolare automaticamente i KPI Lean. Infine, si procede con la creazione di percorsi ottimali bilanciando dinamicamente la linea produttiva in ottica Just-In-Time ed ottimizzando la manodopera. Questo metodo si inserisce perfettamente nel ciclo di miglioramento continuo PCDA, nel quale i dati raccolti dall'IPS consentono di aggiornare costantemente la DVSM e permettendo di prendere decisioni rapide e precise. Gli autori di questo articolo hanno condotto uno studio sperimentale analizzando per 22 giorni una fabbrica che si occupa della produzione di componenti metallici per il settore automobilistico (con un'area di circa 2000 m²) costituita da 5 macchine denominate Heller 1, 2, 3, 4 e Daewoo, sono presenti anche postazioni di assemblaggio e confezionamento come AO2, M4KTK, PACK2 e DHOLE e 40 carrelli manuali dotati di un tag IPS imoiegati per lo spostamento dei semilavorati. In un primo momento in cui erano stati analizzati solamente i dati standard del MES, il 19,74% dei periodi di tempo totale risultavano sconosciuti perché il sistema non teneva traccia di quello che accadeva ai pezzi tra una stazione e la sua successiva. È stato necessario confrontare i dati MES con i dati di posizione dell'IPS, che sono stati campionati ogni 3 secondi. In questa maniera, è stato possibile comprendere e mappare cosa accadeva esattamente in quel lasso di tempo di circa il 20% del tempo totale, individuando tre categorie di spreco: i tempi di coda dei prodotti fermi nei pressi di una stazione prima di essere sottoposto alla lavorazione; lo stoccaggio temporaneo, ovvero delle soste non previste; il trasporto con movimenti fisici calcolati in base alla velocità del carrello. I risultati KPI dimostrano come le macchine Heller erano i colli di bottiglia principali del processo avendo i tempi di ciclo più lunghi. Dall'analisi effettuata si è potuto capire come il tempo di attesa e di spreco totale arrivava quasi al 20% di tutto il tempo di produzione analizzato. In aggiunta, la stazione lavorativa AO2 possedeva il tempo di attesa più critico rispetto alle altre stazioni, indicando agli esperti Lean in che punto intervenire per primi. Alcuni limiti di questo framework riguardano la vicinanza di due stazioni di lavoro perché se sono troppo vicine, l'IPS può avere difficoltà nel distinguere in quale area si trovi il tag. Quindi, è conveniente mantenere una certa distanza fisica tra due zone contigue.

Inoltre, questi tag applicati sui lavoratori devono essere attivi esclusivamente all'interno delle aree lavorative e produttive per non violare la privacy dei lavoratori. Considerando la potenza di questo sistema, i dati e i KPI rilevati devono essere discussi da comitati di gestione con il supporto di esperti di Lean Management per evitare di prendere decisioni operative errate [30].

3.3 Sostenibilità integrata e modelli multidimensionali

L'articolo scientifico ***"Multi-layer multi-variable value stream mapping: A comprehensive framework across operational, environmental, and social layers with integrated KPIs interrelationships"*** descrive lo sviluppo teorico di un framework metodologico rivoluzionario denominato MLMV-VSM, che si riferisce al Multilayer Multivariable Value Stream Mapping, che si pone come obiettivo quello di estendere la portata della VSM classica agli standard sostenibili tipici dell'Industria 4.0 e dell'Industria 5.0. All'interno del contesto manifatturiero odierno, la VSM mappa il flusso dei materiali incentrandosi quasi esclusivamente sugli aspetti temporali ed operativi, non prendendo in considerazione i consumi energetici, le emissioni di carbonio o la gestione dei rifiuti relativi alle varie fasi del processo. Un altro elemento ancora poco considerato è il benessere dei lavoratori perché non sono stati ideati dei metodi per misurare lo stress ergonomico, la fatica o il carico cognitivo degli operatori. Per queste ragioni, nello studio viene fornito il framework MLMV-VSM che oltrepassa la visione unidimensionale della Lean e fornisce una struttura che opera su tre diversi livelli integrati, operando in parallelo:

- Livello operativo, che riguarda le metriche come efficienza, velocità della linea produttiva e produttività classiche della produzione;
- Livello ambientale, che monitora l'aspetto ecologico del flusso di valore tramite i consumi energetici micro-orari, le emissioni e lo spreco di risorse;
- Livello Sociale, che mette a punto per la prima volta degli indicatori quantificabili focalizzati sull'uomo quali i livelli di affaticamento, lo stress ed il rischio ergonomico dei lavoratori.

L'MLMV-VSM analizza i KPI basandosi sulle interdipendenze e sugli effetti a cascata di questi indicatori. Nel presente articolo viene affrontata questa dinamica tramite un esempio che riguarda lo sviluppo delle competenze degli operatori, nel quale un operatore con una maggior formazione e competenza contribuisce ad aumentare il KPI operativo e commettendo meno errori, riducendo lo scarto e spreco di materie prime (KPI ambientale). È molto importante effettuare dei compromessi tra le varie parti di questo metodo perché se si decidesse, ad esempio, di massimizzare la velocità delle macchine per soddisfare un picco di domanda, questo causerà un impatto negativo sugli altri strati dell'MLMV-VSM, che registrerà un'impennata dei consumi energetici, della fatica e dello stress degli operatori, rischiando di compromettere la qualità nel lungo termine. Implementare una mappatura di questo tipo comporta affrontare diverse sfide applicative, come:

- La misurazione delle metriche sociali, infatti calcolare il tempo di ciclo di una macchina risulta molto più semplice rispetto alla valutazione dello stress ergonomico degli operatori in modo oggettivo;
- La gestione dei KPI concorrenti, i decisori dispongono di una grande mole di dati tra loro contrastanti, complicando la scelta del livello da prioritizzare in determinati momenti aziendali;
- La necessità di adattamento in tempo reale che richiede un'infrastruttura tecnologica per raccogliere i dati in modo costante.

La parte finale di questo articolo definisce la roadmap per rendere questa metodologia da teorica a strumento operativo autonomo in modo tale che le fabbriche del futuro sfruttino le tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 come sensori digitali e IoT per la raccolta di dati granulari a livello micro. Alcuni esempi possono essere i sensori di assorbimento elettrico per l'aspetto ambientale e dispositivi indossabili e smart watch per monitorare i movimenti degli operatori per quanto riguarda la parte sociale. Inoltre, l'Intelligenza Artificiale e il Machine Learning costituiscono il vero motore di questo modello, permettendo l'elaborazione di questa moltitudine di dati, scoprendo degli aspetti che gli analisti umani non potrebbero rilevare o simulando l'impatto che una decisione aziendale comporta sul piano dell'efficienza, dell'ambiente e della centralità

dell'essere umano. Per cui, l'articolo ribadisce come la transizione verso l'Industria 5.0 di un'azienda moderna deve interessare sia la produttività e la competitività che la sostenibilità e il benessere dell'essere umano [31].

Alcuni autori provenienti da istituzioni accademiche e governative del Pakistan hanno pubblicato sul *Jurnal Kejuruteraan* un articolo scientifico intitolato ***“Production Enhancement through Integration of Lean, Life Cycle Assessment & Industry 4.0”*** che migliora l'efficienza produttiva e riduce l'impatto ambientale nei paesi in via di sviluppo, come appunto il Pakistan, fornendo un metodo che integra per la prima volta la Lean Manufacturing, il Life Cycle Assessment (LCA) e le tecnologie dell'Industria 4.0. Nel Pakistan o nei paesi ancora in via di sviluppo, all'interno del settore manifatturiero vengono adottate ancora pratiche di produzione obsolete e arretrate comportando una bassa qualità dei prodotti, attività a non valore aggiunto come sprechi di tempo e risorse, una scarsa efficienza complessiva ed una lacuna di strumenti che siano in grado di quantificare i danni ambientali che i processi industriali causano. L'approccio adottato da questa ricerca è suddiviso in fasi sequenziali che consentono di trasformare una linea di produzione. Le diverse fasi che si susseguono sono:

- Fase Lean, nella quale la VSM è in grado di mappare il flusso dei materiali e delle informazioni del *Current State* individuando eventuali colli di bottiglia e tempi morti;
- Fase sostenibile (LCA), che prevede un'analisi di valutazione del ciclo di vita avvalendosi del software SimaPro, calcolando così in maniera scientifica l'impatto sull'ambiente del processo per ciò che concerne le emissioni di carbonio, consumo di risorse ed eco tossicità;
- Fase decisionale, si applica l'algoritmo decisionale multicriterio Analytic Hierarchy Process (AHP) che stabilisce la priorità degli interventi in base ai costi, alla fattibilità ed ai benefici attesi.

Gli autori dell'articolo hanno analizzato la linea di assemblaggio e di produzione di trasformatori elettrici di un'azienda manifatturiera pakistana, applicando successivamente il framework precedentemente introdotto. L'analisi dello stato attuale ha mostrato un processo decisamente inefficiente a causa di layout errati,

movimentazioni eccessive e metodi manuali. Il Production Lead Time risultava essere pari a 36311 minuti (circa 25 giorni) mentre il Value-Added Time, cioè il tempo a valore aggiunto totale, era di solo 447 minuti. Le attività che producevano le emissioni di gas serra più alte e consumavano più energia all'interno dello stabilimento erano le fasi di avvolgimento dei cavi e di assemblaggio del corpo del trasformatore. Per ottenere lo stato futuro, si è utilizzato il metodo AHP individuando quelle che erano le tecnologie dell'Industria 4.0 che risultavano più idonee per risolvere le inefficienze rilevate inizialmente. I processi sono stati automatizzati grazie all'introduzione di macchine di avvolgimento automatiche e sensori per il controllo qualità istantaneo, in questa maniera sono stati ridotti sia i tempi di ciclo che eliminati gli scarti fisici. Anche i tempi di attesa e l'inventario Point-of-Work sono stati ridotti tramite l'utilizzo di sistemi di tracciamento RFID o codici a barre, implementando un sistema Kanban digitale ed ottimizzando i flussi logistici interni. Confrontando lo stato iniziale e lo stato finale, si possono notare netti miglioramenti su tutti i fronti: il Lead Time è passato da 36311 minuti a 16637 minuti, riducendosi del 54,18%; anche il tempo sprecato in attività inutili (Non-Value-Added Time), come attese e trasporti, è diminuito del 54,8%; i nuovi macchinari automatizzati permettono di efficientare l'utilizzo energetico e limitare drasticamente gli scarti di rame ed acciaio, abbassando l'impatto globale dell'intero processo produttivo addirittura del 16%. In conclusione, l'articolo ribadisce l'importanza dell'adozione combinata dell'automazione industriale e dell'I 4.0 con la produzione snella, anche in delle realtà industriali come quelle dei paesi in via di sviluppo ottenendo un vantaggio sia economico-operativo, con industrie sempre più produttive, sia ambientale, implementando processi sempre più sostenibili con minori emissioni. Così facendo, è stato possibile ideare una roadmap che può essere perseguita anche dalle altre aziende della regione [32].

Un altro modello di Lean Manufacturing è il Real-Time Energy Flow Mapping (RTEFM), come afferma il seguente articolo dal titolo ***“Real-time energy flow mapping: A VSM-based proposal for energy efficiency”***. Il contesto nel quale questo metodo si implementa è caratterizzato da un aumento costante dei costi dell'elettricità ed, inoltre, il settore industriale è responsabile del circa il 37% del consumo energetico globale

costringendo le aziende ad adottare delle metriche per ridurre le emissioni di gas serra e ad ottimizzare i processi per mantenere un vantaggio competitivo. Visti i limiti del VSM tradizionale, questi strumenti sono stati uniti alle tecnologie dell'Industria 4.0 senza approfondire, però, la gestione dell'efficienza energetica. Il framework RTEFM è stato strutturato integrando insieme diversi approcci qualitativi e quantitativi, quali:

- Revisione della letteratura e Focus Group: identificando inizialmente 17 modelli VSM incentrati sull'energia e 31 metriche potenziali, poi ridotte a 16 da un gruppo di 7 esperti, suddivise in aree energetiche, ambientali e produttive;
- Metodo Fuzzy Delphi: un team di specialisti è stato sottoposto ad un sondaggio suddiviso in due fasi e così è stato possibile scartare le metriche meno importanti, mantenendo le 13 metriche fondamentali da inserire nel sistema;
- Metodo Fuzzy DEMATEL: un algoritmo che analizza scientificamente le relazioni causa-effetto tra le metriche selezionate, capendo come una possibile variazione del processo produttivo possa influenzare l'impatto ambientale o l'assorbimento di energia.

L'infrastruttura tecnologica digitale 4.0 di questo modello consta di: sensori e IoT per la raccolta dei dati direttamente a bordo della macchina per controllare i consumi elettrici; Edge & Cloud Computing, elaborando rapidamente i dati a livello dell'Edge per avere risposte immediate e su server remoti (Cloud) per lo stoccaggio a lungo termine; Big Data Analytics (BDA), nel quale i dati storici vengono utilizzati per creare modelli predittivi e captare possibili anomalie nei consumi energetici e prevenire i guasti prima ancora che si verifichino; una dashboard personalizzabile protetta da cybersecurity che mostra il flusso energetico dello stabilimento in modo dinamico e, partendo dai parametri reali, i manager possono creare regole o metriche ad hoc. La validità di questo framework è stata testata da una sua applicazione operativa all'interno di un nastro trasportatore di un impianto di produzione del LabFaber 4.0. Si è potuta creare una mappa dinamica dell'energia dei processi industriali, si differenzia tra il consumo di energia a valore aggiunto ed energia consumata senza produrre valore e che costituisce

uno spreco energetico. Sono state individuate, inoltre, le stazioni di lavoro che mostravano il maggior potenziale di risparmio energetico. Gli autori specificano le ricerche future da perseguire in primo luogo riguardanti l'ambito geografico di applicazione del framework perché, in questo caso, gli esperti consultati erano originari esclusivamente del Brasile. Bisogna espandere il campo ed applicare la metodologia all'interno di un processo più grande e non solamente su un singolo modulo, come il nastro trasportatore nel nostro caso. Nonostante ciò, questo framework si dimostra assolutamente interoperabile e neutrale rispetto ai protocolli hardware, essendo facilmente personalizzabile per ogni tipo di organizzazione [33].

3.4 Simulazione avanzata ed ottimizzazione dei processi

In questa macroarea verranno trattate quelle tecnologie dell'Industria 4.0 implementate per migliorare l'efficienza produttiva delle piccole e medie imprese, focalizzandosi principalmente sulla gestione dei macchinari datati e sulla personalizzazione di massa. L'articolo ***"The implementation of Industry 4.0 in manufacturing: from lean manufacturing to product design"*** specifica che le PMI sono affette da due limiti principali come l'utilizzo di macchinari obsoleti incapaci di connettersi e di comunicare dati e i classici strumenti della Lean che non riescono a tenere conto della variabilità dinamica o degli sprechi della manodopera nelle stazioni di lavoro. È stata sviluppata una metodologia basata sul modello dell'architettura RAMI 4.0 che risponde a quattro quesiti di ricerca fondamentali:

- Revamping economico: ci si avvale di sensori di commutazione economici, microcontrollori *Arduino* e moduli wireless *Zigbee* per aggiornare i macchinari obsoleti e per trasformare i segnali fisici della macchina in dati digitali accessibili in tempo reale all'interno e all'esterno dell'azienda;
- Mappatura Dinamica del Flusso di Valore (DVSM): la creazione di una mappa del flusso dinamica ed in tempo reale grazie ai dati IoT consente di isolare tre componenti temporali nelle singole stazioni come il tempo di piegatura teorico, il tempo di sovra piegatura e il tempo di manodopera aggiuntiva;

- Lean Design: fase nella quale il design del prodotto viene migliorato alla radice per facilitare la produzione tramite una tecnica grafica innovativa, la *Weighted Face Adjacency Graph*, apportando le dettagliate informazioni geometriche direttamente sui bordi del modello;
- Misurazione qualitativa della snellezza: applicando la *Slacks-Based Measure* (SBM) insieme al *Data Envelopment Analysis* (DEA), dei modelli matematici oggettivi che paragonano i tempi e costi reali ad uno stato Lean ideale, fornendo un punteggio di efficienza che varia da 0 a 1.

Il caso di studio di questo articolo prevede l'applicazione della metodologia presso un produttore australiano di coperture personalizzate in lega per i cassoni dei pick-up. Il collo di bottiglia più evidente dell'azienda era stato individuato nel processo di piegatura della lamiera per opera di una macchina legacy. La DVSM ha mappato tutti i 19 passaggi di piegatura del pannello laterale evidenziando che l'operatore spendeva molto tempo in attività che non fornivano alcun tipo di valore aggiunto, avendo tempi di setup elevati per cambiare stampi e punzoni a causa delle diverse dimensioni di ogni ordine e a causa degli sprechi di movimentazione dovuti al design del pezzo che creava un'area autobloccante nella fase di piegatura, nella quale l'operatore doveva effettuare manovre manuali e faticose. Una delle soluzioni Lean adottate per la causa è la Logica Heijunka che consentiva di cambiare al volo gli utensili e lavorando in sequenza pannelli di dimensioni diverse che avevano caratteristiche di piega simili, diminuendo anche i tempi di cambio formato. Inoltre, si è pensato di scomporre il pannello singolo in tre componenti separati che risultavano più facili da piegare e garantivano l'eliminazione dell'area autobloccante. Queste varie parti venivano unite nella fase di assemblaggio finale tramite linguette con adesivo, in un processo che era più veloce della saldatura. L'adozione di queste modifiche di progettazione ha decretato la validità dell'operazione raddoppiando l'efficienza grazie alla riduzione dei tempi di setup e di lavorazione, riducendo la movimentazione manuale e i colli di bottiglia dell'officina generando un risparmio di circa 5,692 dollari per unità, traducendosi in un sostanzioso impatto finanziario per l'azienda visti gli alti volumi di produzione. Infine, l'articolo consiglia che non sempre è necessario investire ingenti risorse nell'Industria 4.0 ma, delle volte, basta

un *revamping* economico basato sui sensori IoT tramite i quali le PMI possono usufruire dei dati della Lean Manufacturing in modo trasparente e per prendere scelte di progettazione del prodotto che possano eliminare gli sprechi alla radice [34].

I principi della Lean Manufacturing possono essere anche applicati per migliorare l'efficienza e ridurre i ritardi di un'azienda manifatturiera che produce serbatoi e taniche e opera su commessa con un sistema MTO (Make-To-Order). L'articolo ***“Optimizing Lean Manufacturing for Timely Product Completion in Project Manufacturing Company: A Case Study”*** afferma che il problema principale dell'industria PT.X, chiamata convenzionalmente in questa maniera, risiede nei ritardi per completare i progetti e nelle inefficienze delle fasi operative. La ricerca si pone come obiettivo quello di utilizzare la VSM e il Value Stream Analysis Tools (VALSAT) per individuare sprechi e ottimizzare i processi, consegnando puntualmente i prodotti ai clienti. La ricerca sviluppata prevede una prima fase di identificazione del problema nella quale si definisce l'ambito di studio con un'analisi della letteratura incentrata su Lean, VSM e VALSAT. Successivamente, si passa alla mappatura dello stato attuale dei processi aziendali dal taglio all'assemblaggio e si sottopone il personale a dei questionari per tracciare gli sprechi mediante l'approccio dei “7 sprechi”. Si procede, poi, con l'analisi dei dati utilizzando la matrice VALSAT che permette di definire gli strumenti più idonei da utilizzare. Si è evinto che lo strumento più rilevante era il Process Activity Mapping (PAM), con un'incidenza del 39%. Un altro metodo utilizzato è quello dei “5 Whys”, i 5 Perché, per capire le cause che sono alla base dei problemi. In conclusione, viene proposto lo sviluppo del *Future State Map*, con le raccomandazioni pratiche annesse. La stesura del *Current State* ha reso possibile l'individuazione dei tre maggiori sprechi, tra i quali le attese contribuiscono per il 20% e derivano per la maggior parte da ritardi nell'approvvigionamento dei materiali e dall'ufficio acquisti che incorre in problematiche legate al pagamento tempestivo ai fornitori. Il 18% degli sprechi riguarda i prodotti difettosi dovuti ad errori di movimentazione, alla poca attenzione dei lavoratori o all'inadeguatezza nella manutenzione dei macchinari. Vi sono anche i processi ridondanti presenti, per il 15%, nelle fasi di assemblaggio e lucidatura, delle volte legate alle limitate competenze del personale. Il processo produttivo iniziale

mostrava che le VA, attività a valore aggiunto, rappresentavano il 92% del tempo totale, le attività non a valore aggiunto ma necessarie, come i trasporti, erano del 3% mentre i ritardi puri si aggiravano intorno al 0.6%. Il lead time era stato calcolato ed era pari a 646,5 ore con un tasso di valore aggiunto del 96%. Le soluzioni adottate consentono di risolvere le criticità ottimizzando gli acquisti ed effettuando i pagamenti dei materiali acquistati in tempo per evitare i blocchi della produzione. Bisogna standardizzare la creazione dei disegni tecnici dei serbatoi per velocizzare l'assemblaggio, mantenere regolarmente i macchinari e aumentare le competenze del personale attraverso programmi di formazione continua. Dopo aver implementato lo stato futuro proposto, è stato possibile eliminare totalmente i tempi morti da ritardo, infatti l'NVA è sceso a 0%, e ridurre anche i tempi di trasporto. Si sono registrati netti miglioramenti dell'efficienza operativa generale, diminuzione consistenti dei tempi di consegna al cliente ed un incremento del tasso di valore aggiunto dal 96% al 98%. Quindi, i principi Lean si sono rivelati utili ed efficaci anche in contesti produzione su commessa (MTO) e proponendo come sviluppi futuri da raggiungere l'integrazione dei Digital Twin con tecnologie di automazione, monitorando l'ambiente per una produzione sostenibile ponendo l'attenzione sullo sviluppo delle competenze della forza lavoro [35].

L'articolo ***“Implementation of VSM, simulation and DMAIC methodology for the productivity enhancement of sewing operations in the apparel industry”*** riguarda degli studi volti al miglioramento della produttività e della riduzione dei tempi di consegna all'interno di una linea di cucitura di un'azienda tessile del Pakistan, che realizza e produce denim. Nei paesi in via di sviluppo come il Pakistan, nei quali il settore contribuisce per l'8,5% al PIL, le industrie tessili sono sottoposte a enormi pressioni globali per soddisfare i clienti a prezzi competitivi e con tempi minimi. Quest'azienda pakistana era soggetta a bassa produttività, tempi di consegna alti ed eccesso di Work-in-Process (WIP), accumulando semilavorati lungo la linea produttiva a causa di colli di bottiglia ed operazioni manuali non ottimizzate. Per superare questo problema, è stata proposta una metodologia organizzata nelle cinque fasi del ciclo DMAIC di Six Sigma (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*) supportato dai seguenti strumenti ingegneristici:

- Value Stream Mapping, per mappare in maniera grafica lo stato attuale del processo ed identificare le attività non a valore aggiunto;
- Discrete Event Simulation, il software ARENA trasforma lo stato statico della VSM in un modello dinamico al computer che emula il comportamento reale di operatori e materiali;
- Approccio Integrato AHP-GRA, una volta generati i diversi scenari futuri, si è utilizzato dell'Analytic Hierarchy Process (AHP) insieme alla Grey Relational Analysis (GRA) che hanno permesso, grazie al parere di 35 esperti, di calcolare i pesi delle priorità e scegliere la miglior soluzione.

Lo stato attuale constava di 34 operazioni con un lead time di 1,68 giorni, producendo 2850 pezzi per ogni turno e non riuscendo a coprire la domanda di 3000 pezzi del cliente. I colli di bottiglia sono stati rilevati in stazioni come quella dell'attacco dei carré, la cucitura posteriore e l'attacco delle etichette. Lo stato futuro ha previsto dei miglioramenti che hanno permesso di eliminare le attività superflue, come le operazioni doppie di rifilatura del filo, automatizzando i macchinari per le tasche posteriori e puntatori laser e dimensionando in maniera ottimale i lotti. Adottando questi accorgimenti, le operazioni totali sono scese da 34 a 30, i lead time sono stati ridotti del 73% passando da 1,68 giorni a solamente 0,45 giorni, la produttività è incrementata del 9,3% e quella della produzione per turno del 6,8% soddisfacendo e superando la domanda del cliente con la produzione di 3045 pezzi. Sono stati bilanciati i carichi di lavoro ed eliminati i colli di bottiglia diminuendo la forza lavoro totale da 89 a 87 unità. È stato redatto un piano con responsabilità riguardanti i vari reparti per mantenere i risultati nel tempo, dimostrando come è possibile testare in maniera virtuale i cambiamenti nei processi produttivi tramite simulazione prima ancora di implementare fisicamente il processo, il che comporterebbe sopportare dei costi legati ai tentativi *trial-and-error* ed incorrere in rischi. Il limite di questo studio è che ci si è concentrati solamente su un singolo caso aziendale nel settore del denim, tralasciando le variabili imprevedibili del mondo reale, che possono essere guasti improvvisi dei macchinari o l'assenza degli operatori [36].

3.5 Confronto tra diversi settori di applicazione

Uno dei settori di possibile applicazione delle tecnologie di Industria 4.0 e degli strumenti Lean Healthcare è quello legato alla sostenibilità delle organizzazioni sanitarie. Quest'ultima viene valutata attraverso la Triple Bottom Line (TBL) che considera la dimensione economica, sociale ed economica, come illustrato nell'articolo ***"Combining Industry 4.0 technologies and lean tools for the sustainability of healthcare organizations: a Triple Bottom Line analysis"***. Il sistema sanitario risulta ancora arretrato sia dal punto di vista della gestione dei processi e sia nell'adozione delle tecnologie avanzate. Questa lacuna viene colmata dal connubio tra gli strumenti digitali e le filosofie Lean di riduzione degli sprechi. Questo lavoro risulta originale perché possiede un approccio olistico che unisce I4.0, Lean e TBL all'interno del contesto della sanità. La Revisione Sistemica della Letteratura (RSL) condotta dagli autori segue il protocollo PRISMA partendo da un totale di 1070 studi iniziali, ridotti poi tramite screening e filtrandoli per anno di pubblicazione, individuati in banche dati scientifiche come Scopus o PubMed per il periodo tra il 2011 ed il 2022. Applicando i criteri di inclusione ed esclusione, sono stati analizzati dettagliatamente 43 articoli finali. Il 63,4% di questi articoli ha applicato il metodo del *case study*, confermando l'orientamento applicativo delle ricerche di questo settore. La combinazione tra la tecnologia di simulazione computazionale e la Value Stream Mapping risulta essere la più frequente in assoluto nella letteratura, coprendo il 37,2% degli studi analizzati. Per quanto concerne la prospettiva economica, gli indicatori sono il livello di servizio che si vuole garantire al cliente, la qualità del materiale/personale ed affidabilità. La DES utilizzata con la VSM ha migliorato il livello di servizio riducendo i tempi di attesa dei pazienti, ottimizzando i flussi di lavoro e la gestione dei posti letto. L'impiego della *Six Sigma* ha contribuito a ridurre la variabilità dei processi clinici e migliorando la qualità. Nella prospettiva sociale, invece, molto importanti sono la salute e la sicurezza sul lavoro di personale e pazienti, la loro formazione ed educazione; sono stati creati ambienti di lavoro più sicuri, riducendo lo stress ergonomico e potenziando le competenze del personale grazie agli strumenti Lean quali Kaizen e VSM digitali. La prospettiva ambientale tiene traccia del consumo di risorse e dei rifiuti di produzione e lo strumento

Six Sigma mira ad individuare ed eliminare gli sprechi di materiali medici, riducendo anche l'impatto ecologico delle strutture sanitarie sull'ambiente. Un limite di questa metodologia riguarda l'impossibilità di misurazione quantitativa, ovvero se si verifica il caso in cui un indicatore della TBL è influenzato da due combinazioni diverse di tecnologie e strumenti, non si riesce a stabilire quale delle due sia la combinazione più efficiente da un punto di vista matematico. Le implicazioni future che riguardano i manager ospedalieri permettono loro di consultare una vera e propria guida strategica per identificare gli investimenti tecnologici che garantiscano il miglior ritorno dal punto di vista della sostenibilità e resilienza, come accaduto già in situazioni incerte come la pandemia di COVID-19. Ci si impegnerà ad espandere la ricerca verso delle soluzioni tecnologiche ancora poco esplorate come la Blockchain e l'Intelligenza Artificiale, stando più attenti alla dimensione sociale ed ecologica, spesso trascurate [37].

È stato analizzato anche un altro contesto industriale dello Sri Lanka per ridurre le inefficienze e migliorare le prestazioni operative all'interno degli ospedali, come riporta il seguente articolo ***“Adoption of Industry 4.0 and lean concepts in hospitals for healthcare operational performance improvement”***. Nei paesi in via di sviluppo come lo Sri Lanka è presente ancora una gestione arcaica dei flussi operativi e si fatica ad adottare delle tecnologie digitali perché ci sono pochissimi studi che analizzino l'impatto di queste metodologie sulle prestazioni all'interno degli ospedali. Per cui, si è sentita la necessità di sviluppare un modello che testi l'impatto sulle Prestazioni Operative Ospedaliere (HOP) delle seguenti tre variabili:

- Tecnologie dell'Industria 4.0, che includono i Big Data, l'IoT, il Cloud Computing, l'IA e i vari sistemi RFID di tracciamento;
- Tecniche Lean, comprendente la VSM, il sistema dei 5S per organizzare gli spazi, il Kanban per le scorte di farmaci e il JIT;
- Inefficienze del Sistema Sanitario (HEI), ovvero i tipici sprechi come le attese dei pazienti, gli errori di diagnosi e le movimentazioni non necessarie del personale.

La ricerca del presente articolo si avvale di un approccio misto basato su due fasi, la prima che analizza la letteratura ed i riscontri dei professionisti sanitari per mappare le inefficienze più gravi negli ospedali e la seconda che sottopone ad un questionario un

insieme di pazienti, medici ed infermieri dello Sri Lanka. Una volta raccolti i dati, essi sono stati sottoposti ad analisi attraverso analisi di descrizione Pearson e di regressione multipla per quantificare l'impatto delle variabili. Le conclusioni a cui si è giunti mostrano come le tecnologie digitali siano legate ad un grande miglioramento delle prestazioni degli ospedali e, strumenti come registri elettronici sanitari (EHR) e i sistemi di tracciamento in tempo reale, riducano notevolmente i tempi di ricerca di informazioni e materiali. Tutto ciò si riversa anche sul personale e sui pazienti, che hanno una percezione decisamente positiva dell'enorme impatto di queste tecnologie sulla sanità, contrastando gli errori umani e diminuendo le code dei clienti agli sportelli o in farmacia. Dato che lo studio si è incentrato esclusivamente su un numero ristretto di ospedali dello Sri Lanka, le dinamiche culturali ed economiche potrebbero essere diverse nelle altre zone del mondo. Ci si pone l'obiettivo di condurre casi di studio a lungo termine misurando i parametri metrici ed economici prima e dopo l'applicazione dei framework Lean-Healthcare 4.0 [38].

Un altro settore di applicazione è quello della produzione tessile affrontando un caso di studio nel quale si applica la VSM per migliorare le prestazioni temporali nella fase preparatoria dei processi di produzione. L'articolo ***"Improving the time-based performance of the preparatory stage in textile manufacturing process with value stream mapping"*** si incentra principalmente sull'ottimizzazione del cycle time e del lead time riducendo tutte quelle che sono le attività che non aggiungono valore alla catena del valore di un'azienda tessile del Pakistan. Nel dettaglio, la fase preparatoria della tessitura di nostro interesse consta di due processi principali posti in sequenza: l'orditura (Warping), dove i fili vengono avvolti sui subbi e l'incollaggio (Sizing), nella quale si trattano i fili con delle sostanze chimiche che ne aumentano la resistenza meccanica. Anche se la disponibilità di poche macchine e la variabilità dei flussi di lavoro dovuti ai numerosi cambi di design che i clienti richiedono rendono questi due processi dei colli di bottiglia. Nel *case study* utilizzato dagli autori entrano in gioco dei ricercatori che hanno visitato direttamente i reparti per creare il *Current State Map* dei materiali e delle informazioni, sono stati misurati i tempi di lavorazione e controllati i livelli dei WIP e

delle scorte. Lo studio è stato limitato esclusivamente ad alcuni flussi di valore principali come quello dei fili di cotone da 30 e 30, sia greggi che tinti.

- Il processo di orditura le attività ad effettivo valore aggiunto erano solamente del 54% del tempo totale, l'impostazione dei fili aveva un'incidenza del 15% e variava notevolmente a seconda delle competenze degli operatori. Si è capito, inoltre, che la maggior parte del tempo perso era dovuto alle rotture del filato durante la lavorazione e si sono divisi i fornitori di filato in tre zone: verde, gialla e rossa andando da quelle con qualità eccellente a quelle con qualità più scarsa. Acquistando solamente dai fornitori appartenenti alla zona verde/gialla e addestrando in maniera standard gli operatori, è stato possibile stimare l'aumento della produttività dell'orditura, che si attesta intorno al 15,32%.
- Nel processo di incollaggio, invece, il tempo reale di incollaggio era pari al 33% del ciclo complessivo e l'attività di disegno del filo era molto complessa e incidere per il 21% del tempo. Il supporto ergonomico progettato era un braccio di riposo che si trovava sulla testata della macchina e facilitava l'operatore nella creazione del disegno del tessuto. Operando in questo modo, la riduzione dei tempi a non valore aggiunto può essere intesa come un incremento della produttività del 15,5% al giorno.

L'articolo vuole evidenziare come l'ottimizzazione della Lean non debba limitarsi ad un singolo reparto interno ma possa estendersi lungo tutta la Supply Chain condizionando le modalità d'acquisto delle materie prime. Tra i vari benefici riscontrati vi sono una maggiore visibilità del processo consentendo ai manager di disporre più dati riguardanti la capacità di produzione effettiva, la flessibilità dell'azienda nel rispondere in maniera più rapida alle diverse richieste dei clienti rispettando le scadenze, si è bilanciato il flusso migliorando l'orditura e l'incollaggio evitando i colli di bottiglia ed evitando che i materiali in attesa si accumulino. Adottare questi strumenti lean, quindi, rappresenta il primo passo verso la creazione di una struttura organizzativa necessaria prima ancora di implementare tecnologie digitali avanzate [39].

L'articolo finale di questa sezione, intitolato ***“Enhancing production efficiency through value stream mapping and simulation in the automotive industry”***, riguarda il settore

automobilistico, in particolare le aziende che utilizzando la Value Stream Mapping per mappare i flussi ed identificare gli sprechi. Ma, per superare la staticità tipica di questo strumento, nel presente articolo viene introdotto il concetto di Multi-Machine Activity (MMA) che unisce mansioni ed operatori in delle celle coerenti per un'analisi simultanea, integrando la simulazione ad eventi discreti e le tecnologie dell'Industria 4.0 con la Lean Manufacturing. Questa metodologia è stata applicata all'interno di uno stabilimento di un fornitore Tier-1 che produce sistemi di sterzo in India. Le linee di assemblaggio analizzate nel dettaglio riguardavano due varianti del piantone dello sterzo: il modello guidato, W-501 guided model, e quello non guidato, W-501 non-guided model. L'azienda possedeva un flusso di processo frammentato con *lead time* molto lunghi e con diverse stazioni che non rispettavano il *takt time* teorico necessario, fissato a 71 secondi, per soddisfare la domanda del cliente. I dati raccolti sul campo tramite i *Gemba Walkthroughs* e i modelli di simulazione hanno permesso agli autori di mappare il *Current State* e progettare il *Future State* ottimizzato bilanciando le linee produttive avvalendosi dei sistemi Kanban, degli eventi Kaizen e dell'automazione. Si è creata una tabella che riassume i risultati principali:

Metrica di Performance	W-501 Guidato (Attuale)	W-501 Guidato (Futuro)	W-501 Non Guidato (Attuale)	W-501 Non Guidato (Futuro)
Tempo a non valore aggiunto	7,56 giorni	2,69 giorni	5,88 giorni	2,43 giorni
Lead time di produzione	5,29 giorni	1,92 giorni	4,40 giorni	1,66 giorni
Rapporto di processo (Process Ratio)	0,36%	0,94%	0,39%	0,90%

Metrica di Performance	W-501 Guidato (Attuale)	W-501 Guidato (Futuro)	W-501 Non Guidato (Attuale)	W-501 Non Guidato (Futuro)
Produzione giornaliera	345 unità	388,7 unità	345 unità	388,7 unità

Si può affermare che l’impatto principale derivante da quest’innovazione riguarda l’eliminazione definitiva dei colli di bottiglia. Infatti, nello stato attuale erano presenti 11 attività che sfioravano il *takt time* di 71 secondi mentre nello stato futuro implementato tutte le operazioni si trovano al di sotto di questa soglia. Il tempo a non valore aggiunto (NVA) è stato decrementato del 58%. Nel caso del W-501 guidato la produzione è aumentata, passando da 345 unità al giorno alle 388 unità richieste riducendo anche il *lead time* di oltre il 60% su tutte e due le linee. In definitiva, si può constatare che la simulazione digitale sia un vero e proprio motore di convalida per le trasformazioni Lean in ambienti produttivi complessi e multi-prodotto. Una limitazione che può essere attribuita a questo studio è che esso si basa su una domanda giornaliera costante, per cui bisogna concentrare le ricerche future sull’integrazione di modelli a domanda variabile e curve di apprendimento degli operatori [40].

CAPITOLO 4: ANALISI COMPARATIVA E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Sulla base dei contributi analizzati nel dettaglio nel Capitolo 3, il seguente capitolo propone di strutturare un quadro comparativo trasversale riguardante le evidenze emerse. Le tecnologie abilitanti tipiche dell'Industria 4.0 e 5.0 integrate con i classici strumenti della filosofia Lean, in modo principale la Value Stream Mapping, dimostrano di poter superare i limiti storici legati alla staticità dei dati ed all'unidimensionalità delle analisi.

4.1 Sintesi dei risultati per ciascun modello analizzato

Modello DTVSM (Digital Twin Value Stream Model)

La metodologia incentrata sul Digital Twin e sullo standard IEC 61499 ha permesso di ridefinire la gestione dello stato di salute dei sistemi flessibili. Si è reso possibile l'ottenimento di una diagnosi in tempo reale e di una reattività immediata dinanzi alle anomalie del processo grazie alla scomposizione in blocchi delle funzioni riutilizzabili. I test condotti sperimentalmente mostrano un'efficienza molto elevata nel rilevamento delle deviazioni comportamentali.

Central Digital Kanban Board e l'IVSM (Intelligent VSM)

Passando dalle tradizionali bacheche cartacee alle piattaforme digitali basate su cloud ed architetture, come Supabase o PostgreSQL, è stato possibile eliminare tutti i log manuali e garantire la completa tracciabilità transazionale del Just-In-Time. In particolare, nel settore farmaceutico, è stato calcolato l'OEE integrato in serie in tempo reale e lo si è stratificato in base alle diverse soglie cromatiche di efficienza. Allo stesso modo, il modello dell'Intelligent VSM viene supportato da sensori ed algoritmi di reti neurali artificiali, identificando in maniera istantanea ed automatizzata i colli di bottiglia fisici presenti in officina ed abbattendo nettamente i tempi di latenza informativa.

Approccio Multidimensionale e Sostenibilità (MLMV-VSM e TBL)

I framework MLMV-VSM rispondono alle esigenze caratterizzanti l'Industria 5.0, creando una mappatura che si articola sui livelli operativi, ambientali e sociali. Importanza cruciale è legata all'analisi dei trade-offs riguardanti l'aumento forzato dell'efficienza operativa che potrebbe causare picchi di assorbimento energetico ed il deterioramento del benessere ergonomico degli operatori. All'interno della Lean Healthcare del settore ospedaliero, trova largo impiego l'utilizzo della Triple Bottom Line affiancata dal binomio VSM e Simulazione Computazionale certificando sia l'ottimizzazione dei flussi dei pazienti sia la riduzione del personale clinico.

Revamping Tecnologico e Ottimizzazione nelle PMI

Le ricerche svolte in questo ambito dimostrano come le tecnologie e le innovazioni 4.0 siano accessibili ed utilizzabili anche in presenza di vincoli di budget non indifferenti tramite il revamping low-cost, quali microcontrollori Arduino e moduli wireless Zigbee, di macchinari meccanici obsoleti. L'insieme dei flussi di dati continui, degli strumenti di Lean Design basati su grafi di adiacenza (WFAG) e dei modelli di simulazione digitale ha garantito la riconfigurazione dei processi produttivi e dei lotti, impattando quantitativamente in maniera straordinaria sulle metriche di Lead Time e di output complessivo per turno.

4.2 Tabelle sinottiche di confronto prestazionale

Si riportano le tabelle comparative che puntualizzano aspetti tecnologici, operativi, ambientali con i relativi limiti dei modelli analizzati all'interno della ricerca.

MODELLO/ FRAMEWORK	TECNOLOGIE ABILITANTI 4.0/5.0	STRUMENTI LEAN INTEGRATI	PRINCIPALI RISULTATI E KPI RISCONTRATI
<i>DTVSM (Digital Twin VSM)</i>	Digital Twin, Standard IEC 61499, blocchi di funzioni	Dynamic VSM, Health Management	Tasso di rilevamento anomalie (FDA) del 95,45%; risoluzione diagnostica del 96,19%; latenza allarmi < 8 secondi; falsi allarmi allo 0,018%
<i>Central Digital Kanban Board</i>	Cloud Database (Supabase, PostgreSQL), Web Interfaccia HTML5	Kanban Digitale, Calcolo OEE in serie, JIT	Eliminazione completa dello smarrimento dei cartellini; tracciabilità transazionale dei log; monitoraggio dell'efficienza tramite cruscotti cromatici real- time
<i>IVSM (Intelligent VSM)</i>	Sensori IoT, HMI, Reti Neurali Artificiali, Cloud Server	VSM Intelligente, Teoria dei Vincoli (TOC)	Identificazione automatica del macchinario "collo di bottiglia"; generazione di allarmi di fermo macchina; digitalizzazione dei flussi di comunicazione
<i>MLMV-VSM (Multilayer VSM)</i>	Dispositivi indossabili, Sensori energetici, Machine Learning	VSM Multistrato, Integrazione LCA	Mappatura integrata dei livelli operativo, sociale ed ambientale. Isolamento scientifico degli sprechi energetici e quantificazione dello stress umano
<i>Lean Healthcare & TBL</i>	Simulazione Computazionale, Big Data, IoT	Lean Healthcare (Kaizen e Kanban)	Ottimizzazione dei posti letto e dei flussi dei pazienti

			nel 54,6% dei casi; abbattimento degli sprechi medici e dello stress del personale
<i>Revamping PMI & Lean Design</i>	Arduino, Zigbee, Simulazione Digitale, Modelli SBM-DEA	Dynamic VSM, Grafi WFAG, Livellamento Heijunka	Riduzione del Lead Time del 73%, aumento produttività del 9,2% e produzione per turno del 6,8%; organico ottimizzato

4.3 Analisi delle Limitazioni e degli Sviluppi Futuri

I framework analizzati evidenziano specifici vincoli riferiti alla maturità tecnologica, al contesto di applicazione o all'architettura dei dati, definendo in maniera precisa le traiettorie di ricerca per il futuro.

MODELLO/Framework	LIMITAZIONI E VINCOLI ATTUALI	TRAIETTORIA DI SVILUPPO FUTURO
<i>DTVSM/IVSM</i>	Tet eseguiti quasi esclusivamente in ambienti controllati; gestione di un disturbo per volta	Integrazione di algoritmi predittivi basati su serie temporali e introduzione di Grafi di Conoscenza
<i>MLMV-VSM</i>	Complessità nella misurazione delle metriche sociali, come stress, e gruppo di esperti geograficamente ristretto	Estensione del monitoraggio ai flussi industriali continui; completa interoperabilità e neutralità hardware
<i>Lean Healthcare</i>	Focalizzazione su domande giornaliere costanti e natura esclusivamente qualitativa della letteratura	Inclusione di modelli don domanda variabile, tecnologie Blockchain e curve di apprendimento del personale
<i>Revamping e Simulazione KPI</i>	Focalizzazione su singoli casi di studio industriali e assenza di variabili stocastiche	Riadattamento dei parametri per altri settori manifatturieri ed integrazione di variabili stocastiche di real-word

4.4 Matrice di Posizionamento Strategico (Trade-offs e Requisiti)

I diversi modelli analizzati nello studio presentano differenti bilanciamenti in base ai costi di implementazione, complessità tecnologica e benefici ottenuti. Si è creata la seguente tabella per mappare le relazioni e supportare i manager nel prendere le loro decisioni:

MODELLO/Framework	<i>DTVSM/IVSM</i>	<i>MLMV-VSM/TBL</i>	<i>Revamping PMI</i>
COSTO DI IMPLEMENTAZIONE	Medio/Alto	Medio	Molto basso
COMPLESSITÀ ARCHITETTURA	Alta; richiesti Digital Twin e standard IEC 61499	Media; integrazione di sensori ambientali e wearable	Bassa; previsti hardware open-source, Arduino, Zigbee
FOCUS PRINCIPALE	Eliminazione totale della latenza tra anomalia e diagnosi	Tracciamento simultaneo dei KPI operativi, energetici e sociali	Digitalizzazione di linee di produzione obsolete con budget ridotti
TRADE-OFF PRINCIPALE	È richiesta un'infrastruttura automatizzata già parzialmente moderna	La misurazione delle metriche sociali è, in parte, soggettiva	Il modello matematico trascura le variabili stocastiche, come guasti improvvisi

4.5 Discussione dei risultati e sintesi dell'evoluzione

Le conclusioni principali che emergono dall'analisi comparata degli articoli riguardano:

- Il passaggio dalla staticità al dinamismo degli strumenti cartacei del VSM tradizionale. Sono necessari database cloud e microcontrollori economici per rendere la mappatura del valore uno strumento di controllo dinamico e quotidiano, non una fotografia isolata e fine a sé stessa;
- La convergenza tra Lean e Simulazione nel settore manifatturiero avanzato e in quello sanitario. La Simulazione Computazionale consente ai manager di validare

la Future State Map in un contesto virtuale prima di investire capitali per cambiare il flusso fisico delle linee produttive;

- Il cambiamento da Industria 4.0 a 5.0. Inizialmente, i modelli del DTVSM erano incentrati quasi solamente sull'efficienza delle macchine e sulla riduzione dei tempi. I modelli creati di recente si basano sui pilastri dell'Industria 5.0 dimostrando come l'accelerazione forzata delle linee produttive per i miglioramenti dei KPI operativi genera una ripercussione negativa sui consumi energetici e sul benessere ergonomico del lavoratore.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi si è posto l'obiettivo di analizzare con occhio critico l'evoluzione della Value Stream Mapping (VSM), sottolineando il radicale cambiamento nella metodologia e nella tecnologia che ha trasformato questo strumento tipico della filosofia *Lean Production* in una piattaforma dinamica e multidimensionale di controllo strategico. Tramite una mappatura precisa della letteratura scientifica avvenuta grazie all'impiego del framework PRISMA 2020, si è potuto tenere traccia della transizione dei modelli di mappatura del flusso del valore lungo le direzioni designate dalle rivoluzioni dell'Industria 4.0 e dell'Industria 5.0.

L'analisi effettuata ha evidenziato come la VSM tradizionale, pur continuando a identificare i *Muda* e a calcolare parametri fondamentali come il *Lead Time* e il *Takt Time*, avesse enormi limiti operando nell'elevato dinamismo dei moderni contesti produttivi *High-Mix Low-Volume*. L'Industrial Internet of Things (IIoT), il Manufacturing Execution System (sistema MES) e l'Indoor Positioning System (IPS) sono delle tecnologie digitali che sono state integrate per colmare le lacune della VSM descritte precedentemente, decretando la nascita della *Digital* ed *Electronic VSM*.

Un altro pilastro emerso dalla ricerca condotta interessa la convergenza tra i principi Lean e le tecniche di simulazione avanzata, ad eventi discreti. Oggi, i manager industriali possono contare sui Digital Twin per testare e validare l'efficacia della Future State Map di ambienti virtuali protetti, riducendo il rischio di investire grandi capitali prima dell'effettiva riconfigurazione fisica delle linee produttive. Questo processo viene supportato ed accelerato dall'introduzione delle reti neurali convoluzionali, abilitando logiche predittive nell'ottica *Kaizen* di migliorare continuamente.

Tra le varie innovazioni portate da queste tecnologie, il contributo maggiore delineato dallo Stato dell'Arte riguarda il passaggio dall'Industria 4.0 all'Industria 5.0. Di recente, si stanno diffondendo sempre di più framework, come l'MLMV-VSM, che rispettano la sostenibilità integrata secondo la filosofia della Triple Bottom Line. In questa nuova ottica, i parametri operativi ed economici cooperano con gli indicatori di impatto ambientale, valutati tramite il *Life Cycle Assessment (LCA)*, e sociali riguardanti

l'ergonomia, la sicurezza ed il benessere psicofisico dell'operatore. Nonostante il miglioramento dei KPI di impianto, nella ricerca si è potuto dimostrare come accelerare in maniera forzata i ritmi produttivi generi effetti negativi sui consumi energetici o sullo stress della manodopera, rendendo necessario un approccio olistico che vede ancora l'essere umano al centro della fabbrica intelligente.

In conclusione, si può affermare definitivamente come la transizione verso una *Lean* digitale sia ancora caratterizzata da limiti di natura finanziaria, competenze specialistiche e complessità legate all'architettura dei dati, in maniera particolare per le Piccole e Medie Imprese (PMI). Questa tesi si propone di fornire delle tabelle di marcia e delle matrici di posizionamento strategico, garantendo ai decisori aziendali l'avere a disposizione dei criteri necessari che permettono loro di bilanciare i *trade-off* tecnologici e scegliere la direzione di digitalizzazione snella che più si confà alle proprie esigenze. Gli sviluppi futuri della ricerca saranno orientati verso la necessità di semplificare questi framework multidimensionali, avvalendosi di algoritmi predittivi basati su serie temporali e standardizzando l'interoperabilità dei dati per rendere la transizione 5.0 una realtà accessibile all'interno del contesto industriale.

BIBLIOGRAFIA

[1]	L. Gourley, «Lean production o produzione snella: I 5 principi chiave,» 2024. [Online]. Available: https://www.ptc.com/it/blogs/iiot/defining-lean-production .
[2]	G. Massacesi, «5 principi della Lean Production: guida alla produzione snella,» 2019, [Online]. Available: https://www.opta.it/operations-management/lean-production/principi-lean-production/ .
[3]	Headvisor, «Value Stream Mapping (VSM): cos'è e come si fa,» 2023. [Online]. Available: https://www.headvisor.it/value-stream-mapping-vsm .
[4]	Leanprove, «Cos'è la Value Stream Mapping e come si disegna,» 2022. [Online]. Available: https://www.leanprove.com/it/news/value-stream-mapping-2/ .
[5]	L. M. Italia, «Value Stream Mapping - Mappatura del flusso di valore,» 2021. [Online]. Available: https://www.leanmanufacturing.it/strumenti/valuestreammapping.html .
[6]	Qualitiamo, «Value Stream Map: i simboli - prima parte,» 2018. [Online]. Available: https://www.qualitiamo.com/articoli/value-stream-map-simboli-1.html .
[7]	Edrawsoft, «Simboli della Mappatura del Flusso di Valore (VSM),» 2023. [Online]. Available: https://www.edrawsoft.com/it/value-stream-map-symbols.html .
[8]	T. d. Produzione, «Produzione a celle e Group Technology,» 2016. [Online]. Available: https://tecnicodiproduzione.wordpress.com/2016/05/24/produzione-celle-group-technology/ .
[9]	G. Alderighi, «Come scegliere le famiglie di articoli per le celle di produzione,» 2020. [Online]. Available: https://giannialderighi.com/blog/produzione/scegliere-famiglie-di-articoli-per-celle-di-produzione/ .
[10]	S. S. Global, «Mappatura del flusso di valore (VSM): Flusso End-to-End,» 2022. [Online]. Available: https://sgssystemsglobal.com/it/glossario/mappatura-del-flusso-di-valore-vsm-flusso-end-to-end/ .
[11]	Asana, «Cos'è la mappatura del flusso di valore (VSM)?,» 2026. [Online]. Available: https://asana.com/it/resources/value-stream-mapping .
[12]	T. d. Produzione, «La VSM dello stato attuale (As-Is),» 2016. [Online]. Available: https://tecnicodiproduzione.wordpress.com/2016/11/03/la-vsm-dello-stato-attuale-as-is/ .
[13]	Q. Informatica, «Il Lead Time di produzione: cos'è e come si calcola,» 2021. [Online]. Available: https://www.qualitas.it/blog/il-lead-time-di-produzione-cose-e-come-si-calcola .
[14]	Headvisor, «Future State Map: mappare lo stato futuro,» 2023. [Online]. Available: https://www.headvisor.it/future-state-map .
[15]	L. Cloud, «IoT nella manifattura avanzata: dal Lean Manufacturing all'Industria 4.0,» 2022. [Online]. Available: https://logbot.cloud/iot-nella-manifattura-avanzata-dal-lean-manufacturing-allindustria-4-0/ .

[16]	e. Group, «Digital Value Stream Mapping or Traditional: What to Expect,» 2024. [Online]. Available: https://www.evsm.com/digital-value-stream-mapping-or-traditional .
[17]	Edrawsoft, «I 6 migliori software per la mappatura del flusso di valore (VSM),» 2023. [Online]. Available: https://www.edrawsoft.com/it/6-best-vsm-software.html .
[18]	e. Group, «Microsoft Visio for Value Stream Mapping,» 2024. [Online]. Available: https://www.evsm.com/Visio-for-value-stream-mapping .
[19]	A. Beccati, «Cos'è la Value Stream Mapping e perché applicarla ai progetti,» 2025. [Online]. Available: https://www.andreabeccati.it/value-stream-mapping/ .
[20]	G. Angelini, «La revisione sistematica della letteratura e il metodo PRISMA,» 2023. [Online]. Available: https://www.stateofmind.it/2023/12/revisione-sistematica-prisma/ .
[21]	M. Garo, «La revisione sistematica della letteratura e il metodo PRISMA,» 2020. [Online]. Available: https://www.stateofmind.it/2023/12/revisione-sistematica-prisma/ .
[22]	U. d. S. d. Firenze, «Strumenti e metodi per la ricerca bibliografica sistematica,» 2020. [Online]. Available: https://formstudelearning.unifi.it/mod/book/view.php?id=2623&chapterid=390 .
[23]	Y. Wang, «Rivista dei sistemi di produzione,» 2026. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/105041166746?origin=resultslist .
[24]	I. Medhat, «International Journal of Advanced Manufacturing Technology,» 2025. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/105021097684?origin=resultslist .
[25]	R. C. S. Mariappan, «International Journal of Advanced Manufacturing Technology,» 2023. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/85174013412?origin=resultslist .
[26]	M. Bega, «Production Engineering,» 2023. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/85164182316?origin=resultslist .
[27]	W. d. P. Ferreira, «Journal of Manufacturing Systems,» 2022. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/85125134294?origin=resultslist .
[28]	E. Publishing, «Benchmarking,» 2026. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/85216375151?origin=resultslist .
[29]	M. Shahin, «International Journal of Advanced Manufacturing Technology,» 2024. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/85197366209?origin=resultslist .
[30]	T.-A. Tran, «Applied Sciences,» 2021. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/85108183016?origin=resultslist .
[31]	A. Heydarzade, «Manufacturing Letters,» 2025. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/105014947341?origin=resultslist .

[32]	T. Ijaz, «Jurnal Kejuruteraan,» 2023. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/105008876192?origin=resultslist .
[33]	L. Fontoura, «Journal of Cleaner Production,» 2023. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/85166246824?origin=resultslist .
[34]	Z. Huang, «International Journal of Advanced Manufacturing Technology,» 2022. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/85132155384?origin=resultslist .
[35]	R. Oktavera, «International Journal of Integrated Engineering,» 2025. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/105023302559?origin=resultslist .
[36]	H. Nawaz, «International Journal of Productivity and Performance Management,» 2025. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/105028766797?origin=resultslist .
[37]	L. P. Reis, «Journal of Health Organization and Management,» 2026. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/105020748071?origin=resultslist .
[38]	T. S. Ilangakoon, «International Journal of Productivity and Performance Management,» 2022. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/85113739789?origin=resultslist .
[39]	D. Hussain, «Business Process Management Journal,» 2023. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/85152081692?origin=resultslist .
[40]	V.-S. J., «International Journal of Industrial Engineering and Management,» 2025. [Online]. Available: https://www-scopus-com.ezproxy.cad.univpm.it/pages/publications/105017320636?origin=resultslist .