



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

**LEAN PRODUCTION E MANUTENZIONE INDUSTRIALE:
ANALISI DELLE APPLICAZIONI ESISTENTI**

**LEAN PRODUCTION AND INDUSTRIAL MAINTENANCE:
ANALYSIS OF EXISTING APPLICATIONS**

Relatore:

Prof.ssa Sara Antomarioni

Tesi di Laurea di:

Alessio Andreucci

A.A. 2023/ 2024

A nonno Duilio, che più di chiunque altro avrebbe voluto vedermi qui oggi.

INDICE

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1: LEAN PRODUCTION	3
1.1. CENNI STORICI	3
1.2. I 5 PRINCIPI	4
1.3. I MUDA	6
1.4. GLI STRUMENTI LEAN	9
1.4.1. Tecnica delle 5S	9
1.4.2. Spaghetti diagram	11
1.4.3. Poka Yoke	12
1.4.4. Value stream mapping	12
1.4.5. Kanban	15
1.5. HOUSE OF LEAN	16
CAPITOLO 2: MANUTENZIONE INDUSTRIALE	19
2. IL CONCETTO DI MANUTENZIONE E LA SUA EVOLUZIONE NEL TEMPO 19	
2.1. AFFIDABILITA'	20
2.2. DISPONIBILITA'	21
2.3. STRATEGIE DI MANUTENZIONE	22
2.3.1. Manutenzione correttiva	22
2.3.2. Manutenzione preventiva	23
2.3.3. Manutenzione predittiva	24
2.4. MANUTENZIONE E INDUSTRIA 4.0	25
2.5. TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE (TPM)	27
CAPITOLO 3: ANALISI DELLA LETTERATURA	30
3.1. LA LETTERATURA ESISTENTE	30
3.1.1. Lean production	30
3.1.2. Manutenzione industriale	33
3.2. CLUSTER ANALYSIS	36
CONCLUSIONI	40
BIBLIOGRAFIA	41

“Non avere problemi è il più grande dei problemi”

(Taiichi Ohno)

INTRODUZIONE

Al giorno d'oggi ogni impresa che appartiene al settore industriale per poter raggiungere i propri obiettivi deve riuscire ad implementare i concetti che si trovano alla base della filosofia Lean. La produzione snella si basa sulla riduzione e sulla conseguente eliminazione di tutto quello che non porta valore aggiunto al prodotto. Più in particolare, si cerca di raggiungere una produzione che venga eseguita nel giusto momento, rispettando le tempistiche stabilite, nella corretta quantità e mantenendo un'alta qualità del prodotto. Anche la manutenzione industriale gioca un ruolo fondamentale in termini di raggiungimento degli obiettivi e redditività in un'azienda. In generale, con questo termine si fa riferimento a tutte quelle azioni che vengono effettuate per conservare o recuperare lo stato di un'entità che può essere, ad esempio, l'attrezzatura utilizzata nello svolgimento di una specifica lavorazione.

Partendo da questi concetti, il presente lavoro di tesi ha l'obiettivo di illustrare ed analizzare le metodologie, facendo anche riferimento al collegamento presente tra le due. Nel primo capitolo viene descritta la produzione snella partendo da un quadro introduttivo che ne descrive la nascita e lo sviluppo. Si prosegue con la spiegazione dei cinque principi che ne sono alla base. Successivamente vengono illustrati i MUDA, ovvero gli sprechi che caratterizzano la produzione di un determinato articolo. Il capitolo continua con la descrizione delle principali metodologie Lean: le 5S, lo spaghetti diagram, i poka yoke, il value stream mapping e il kanban. Infine, si conclude con la presentazione del modello "house of Lean" che riassume e chiarisce gli obiettivi, i pilastri e il basamento dell'intera filosofia.

Nel secondo capitolo viene trattata la manutenzione industriale, cercando di darne una spiegazione a 360 gradi. Inizialmente viene descritto cosa si intende per manutenzione e la sua evoluzione nel tempo, facendo riferimento alla UNI EN 13306. Si prosegue illustrando i concetti che ne sono alla base: affidabilità e disponibilità. Successivamente, viene lasciato spazio alla descrizione di un aspetto chiave della manutenzione, ovvero la strategia da adottare. In particolare, viene fatto riferimento ai tre principali approcci correttivi, preventivi e predittivi. Il capitolo continua con una parte dedicata alla manutenzione 4.0, che unisce gli aspetti manutentivi alla quarta rivoluzione industriale. Infine, si conclude con la descrizione della Total Productive Maintenance (TPM), che si collega ai concetti trattati nel capitolo precedente. In questa sezione viene lasciato

spazio anche all'illustrazione dell'indice OEE, il più utilizzato per la valutazione delle azioni manutentive adottate.

Nel terzo capitolo è stata effettuata un'analisi della letteratura esistente, prendendo in esami una serie di articoli scientifici di recente pubblicazione. Sono stati suddivisi in due categorie per metodologia utilizzata: Lean production o manutenzione industriale. Successivamente, è stata eseguita l'analisi attraverso l'utilizzo del software Vosviewer, con il quale è stato possibile creare delle mappe che vadano ad evidenziare differenti aspetti legati alla bibliografia.

Per terminare il lavoro, vengono presentate le conclusioni che descrivono e spiegano i risultati che sono stati ottenuti con l'intera analisi.

CAPITOLO 1: LEAN PRODUCTION

1.1. CENNI STORICI

Agli inizi del Novecento la fabbricazione era basata sul modello fordista della produzione di massa, caratterizzato su delle previsioni di mercato e sul mantenimento di un alto livello di inventario. Nel 1908 Henry Ford realizzò il modello T basato su una produzione continua di grandi quantità di “pezzi standard” di facile sostituzione, di misera qualità e che venivano venduti a prezzi relativamente bassi. Il sistema operativo era caratterizzato dalla catena di montaggio composta da un nastro trasportatore e da operai specializzati che eseguivano ad un ritmo cadenzato determinate azioni. A metà degli anni Cinquanta le imprese si imbattono in problemi dovuti alla crescita della concorrenza e a dei clienti con nuove aspettative in termini di innovazione e qualità dei prodotti. Eiji Toyoda, fondatore dell'azienda automobilistica Toyota, e il suo ingegnere Taiichi Ohno capirono che il momento di crisi che stavano affrontando era dovuto ad un sistema di produzione ormai obsoleto. Da qui è nata una nuova filosofia di produzione: la Lean Production, conosciuta anche come produzione snella. Alla base di questo approccio c'è l'eliminazione di ogni tipo di spreco, ovvero di tutto ciò che non porta valore aggiunto al processo produttivo. Si tratta di una produzione eseguita nel giusto momento, nella corretta quantità, eliminando tutte le scorte non necessarie e mantenendo un'alta qualità del prodotto. Nel 1973 con la crisi petrolifera che colpì il Nord America ci fu un interessamento nel nuovo sistema giapponese, seguito dalla pubblicazione di vari articoli accademici. Tra i tanti si può fare riferimento a quello di Sugimori che contiene argomenti riguardanti, per esempio, il kanban o il modello just in time. Formalmente la data che vede l'introduzione della Lean production in America è il 1984 con la fondazione della NUMMI, un'azienda automobilistica di proprietà congiunta di general Motors e Toyota. Negli anni successivi si ebbe un immediato sviluppo nelle imprese manifatturiere a livello globale e in imprese non convenzionali grazie alla pubblicazione di articoli e libri accademici come il “the machine that changed the world” di Womack e Jones (1990), che descrive i principi e gli strumenti alla base di questa nuova filosofia produttiva (De Minicis, n.d.; Jastia & Kodali, 2015; Shah & Ward, 2007).

1.2. I 5 PRINCIPI

Ogni azienda di successo basa gli obiettivi da raggiungere sul cliente, più precisamente sulle sue esigenze. Proprio su questo si basano i 5 principi Lean: Value, Value Stream, Make the product flow, Pull e Perfection.

Nel primo è necessario identificare tutto ciò che viene definito come valore per il cliente e quello che non lo è. Con valore si vuole intendere ciò per cui i consumatori di un prodotto/servizio sono disposti a pagare. Per citare alcuni esempi, si può fare riferimento ad un buon prezzo o una buona velocità e modalità di consegna. Un fattore di fondamentale importanza è, senza dubbio, la qualità. Un prodotto affidabile, sicuro, che non presenti difetti e che eserciti un buon servizio porterà il cliente ad acquistarlo nuovamente andando a creare una sorta di legame di fedeltà con l'azienda produttrice. In molti casi viene fatto l'errore di pensare che un costo basso porti sempre all'acquisto. Tutte le caratteristiche che non vengono considerate come un valore aggiunto fanno sì che un determinato prodotto, considerato economico, dal punto di vista del cliente diventi costoso perché non è disposto a pagarlo. Il prossimo step consiste nell'identificare il flusso del valore. Vengono coinvolti tutti i componenti di un processo produttivo, a partire dal fornitore fino ad arrivare al cliente. Ogni fase porta al completamento di un prodotto aggiungendo valore allo stesso nelle modalità precedentemente descritte. Per poter fare un'analisi del flusso di lavoro si possono usare degli strumenti Lean, come ad esempio il value stream mapping o lo spaghetti diagram. A questo punto, si deve rimuovere tutto ciò che va ad ostacolare il flusso produttivo. Quest'ultimo deve essere unico e continuo senza presentare sprechi di tempo, di prestazioni e di qualità così da poter consegnare il prodotto al cliente nelle giuste quantità e tempistiche. Con "pull" si intende, tradotto in italiano, il cosiddetto flusso "tirato al cliente". Si basa sul produrre ciò di cui i clienti hanno bisogno, nelle corrette quantità e nel giusto momento, evitando gli sprechi che intaccano il processo produttivo. In questo modo si evita una produzione eccessiva che porterebbe un aumento del magazzino con prodotti finiti che rimangono invenduti. Il sistema pull inizia con il cliente, prosegue con la produzione e termina quando il consumatore ritira il prodotto, coinvolgendo tutti i componenti del processo produttivo, dai fornitori fino al cliente finale. Infine, un elemento fondamentale alla base della Lean production è la continua ricerca della perfezione. Facendo riferimento alla filosofia giapponese si parla di kaizen, parola composta da "kai" (cambiamento) e "zen" (in meglio). Questo processo di continuo miglioramento avviene grazie al coinvolgimento di tutti i protagonisti di un'azienda, a partire dal top manager fino al dipendente ordinario.

Alla base di questo approccio si trova il ciclo plan-do-check-act (PDCA), noto anche come ciclo di Deming. Nella prima fase vengono stabiliti gli obiettivi in base ai risultati che si vogliono raggiungere. Successivamente, si mette in pratica tutto ciò che era stato pianificato attraverso piccoli step. Si prosegue con lo studio e il controllo dei risultati ottenuti e si termina stabilendo le manovre che dovranno essere compiute per poter migliorare tutto il processo. Il kaizen viene espresso attraverso una serie di linee guida che ne riassumono i concetti alla base:

1. Liberati delle idee convenzionali
2. Pensa a come far funzionare le cose, non al motivo per il quale non funzionano
3. Non trovare scuse o giustificazioni, inizia mettendo in discussione le pratiche attuali
4. Non cercare la perfezione, esegui le cose subito anche se si raggiunge il 50% dell'obiettivo
5. Se commetti un errore, correggilo subito
6. Chiedi "perché" almeno cinque volte e cerca le cause del problema
7. Meglio la saggezza di dieci persone che la conoscenza di una
8. Non chiedere ai dipendenti di lasciare il cervello fuori dal cancello della fabbrica
9. Usa la saggezza per risolvere il problema, non il denaro

In conclusione, gli obiettivi sono: ottenere un miglioramento nell'utilizzo dello spazio, della qualità del prodotto, della produzione e della capacità di portare i clienti al riacquisto, l'ottenimento di risultati immediati e ridurre gli sprechi, i tempi di attesa, il movimento dei lavoratori e una produzione eccessiva (Hamed & Soliman, 2017; Prošić & Sc, n.d.; Singh & Singh, 2009).



Figura1. I 5 principi Lean

https://ingegneriaagileesnella.wordpress.com/wpcontent/uploads/2015/08/5_lean_principles.jpg

1.3. I MUDA

Fino a questo momento si è detto che è necessario identificare e rimuovere tutto ciò che non porta valore aggiunto per il cliente. Tra i fattori che vanno ad ostacolare il flusso produttivo si evidenziano i 7 sprechi, noti anche come “muda” nella cultura giapponese. Borris è riuscito a determinare una relazione tra il profitto e gli sprechi presenti nelle varie operazioni attraverso la seguente formula:

$$\text{profitto} = \text{ricavi} - \{(\text{costi fissi} + \text{costi variabili}) + \text{sprechi}\}$$

Con questa, si può concludere che è possibile aumentare i profitti attraverso l'identificazione delle cause delle perdite.

Di seguito vengono analizzati gli sprechi che caratterizzano un processo produttivo.

Trasporti

Si intendono tutti i movimenti di materiali che vengono eseguiti in una linea produttiva. I metodi di trasporto più utilizzati sono tramite rimorchi, manualmente o con l'utilizzo di carrelli elevatori. Il primo viene preferito quando il centro dei materiali acquistati è lontano dalle celle di produzione, a differenza del secondo che viene utilizzato quando sono vicini all'impianto. Il terzo metodo, oltre ad essere il più costoso, presenta dei problemi legati alla sicurezza e richiede dei conducenti esperti affinché i prodotti trasportati non vengano danneggiati. Per questa serie di motivi vengono preferiti gli altri due. I problemi legati ai trasporti derivano principalmente dalla distanza tra le fasi del processo e tra le macchine all'interno di una linea produttiva, dalla distanza delle postazioni di lavoro agli strumenti e dalla distanza dei magazzini dai reparti di servizio. La soluzione a questi problemi è l'utilizzo di un layout cellulare che vada a raggruppare macchine, persone e metodi insieme eliminando l'utilizzo di una produzione livellata.

Inventario

Comprende tutti i work-in-progress e i prodotti finiti che aspettano di essere venduti. Tenere un livello di inventario alto può portare a dei costi in termini di spazio e profitto. Davanti ad un investimento per l'acquisto dei materiali per la realizzazione di un prodotto ci deve essere un ritorno. Più questo avviene velocemente meglio sarà per l'impresa, dato che si andranno a generare interessi su una quantità di denaro che poteva essere reinvestita. Da sottolineare c'è anche il fatto che tenendo dei prodotti in magazzino c'è il rischio di imbattersi in problemi dovuti al deterioramento o al danneggiamento. Con un livello di inventario alto non si ha la certezza di poter vendere i prodotti presenti al suo

interno perché, come è ben noto, il mercato è dinamico ed è soggetto a cambi continui. Inoltre, questi prodotti devono essere collocati in uno spazio munito di sistemi di ventilazione, di energia o di equipaggiamento che rappresentano un costo per l'azienda. Ciò non significa che va ridotto a zero, ma va mantenuto un livello minimo di sicurezza attraverso delle tecniche come, ad esempio, il kanban (pull card) per fornire, durante la produzione, i materiali necessari nella giusta quantità e nei tempi corretti.

Movimenti

Gli operai hanno bisogno che gli strumenti di cui necessitano per eseguire un determinato lavoro si trovino vicino alla postazione, rimuovendo i tempi morti dovuti, ad esempio, a spostamenti. Una tecnica molto utile per eliminare questi tipi di problemi è quella delle 5S.

Attese

Rappresenta il fattore legato alle perdite di tempo e possono essere raggruppate nelle seguenti categorie:

- Attesa dei materiali
- Attesa dei pezzi di ricambio
- Attesa del processo di controllo qualità
- Attesa del servizio di manutenzione
- Attesa derivante da basse prestazioni o velocità della macchina
- Attese legati a tempi di fermo macchina
- Attese del programma di caricamento della macchina CNC
- Attese di istruzioni e disegni progettuali

Una volta identificate queste perdite di tempo si può definire il takt time, ovvero il ritmo teorico di produzione necessario a soddisfare la domanda.

$$\text{Takt time} = \frac{\text{tempo di produzione disponibile}}{\text{domanda del cliente}}$$

Sovraproduzione

La sovrapproduzione e il livello di inventario sono strettamente legati tra di loro. Una produzione eccessiva porta alla creazione di work- in- progress e prodotti finiti che non vengono venduti, con un conseguente aumento dei costi sopra citati. Un'altra categoria che ne subisce gli effetti è quella dei trasporti. Ciò comporta che questo rappresenta lo

spreco da eliminare in principio per non incorrere in ulteriori problematiche. La tecnica più utilizzata per poter raggiungere tale scopo è la metodologia kanban.

Processamento

Si intendono tutte le attività/fasi in più o non necessarie all'interno di un processo produttivo. Attraverso la loro rimozione si va in contro ad un miglioramento e ad una riduzione dei tempi. Il processamento non coinvolge soltanto il processo produttivo in sé, ma anche altri fattori che caratterizzano il flusso del valore. Si può far riferimento, ad esempio, alla manutenzione o al trasporto dei materiali.

Difetti

Quando si parlava di valore per il cliente veniva sottolineata l'importanza della qualità del prodotto. I difetti non si trovano soltanto in un processo produttivo, ma si possono incontrare in ogni fase che porta alla realizzazione del bene. Per ridurre la presenza si opta per una standardizzazione del lavoro, per permettere di individuare i problemi e correggerli. Il costo della qualità può essere espresso come: *costo dei difetti + costi di rilavorazione e delle modifiche da apporre* (Hamed & Soliman, 2017).



Figura 2. I MUDA

<https://oraconsulting.altervista.org/blog/wp-content/uploads/2021/01/l-7-sprechi.jpg>

1.4. GLI STRUMENTI LEAN

Ora si procederà con la spiegazione e l'analisi dei principali strumenti che caratterizzano il pensiero snello e che condividono l'obiettivo di eliminazione degli sprechi e del continuo miglioramento.

1.4.1. Tecnica delle 5S

L'obiettivo di questa tecnica è mettere ordine nell' ambiente di lavoro per poter ottenere un'efficienza migliore e mantenere il luogo sicuro, con conseguente riduzione della difettosità di un prodotto. Si compone di cinque parole giapponesi che racchiudono il suo funzionamento. La prima è Seiri (sort) e consiste nell' ordinamento dei materiali in necessari e non necessari, posizionandoli nel posto corretto rendendoli di facile accesso per i lavoratori. La presenza di materiali e strumenti che vengono utilizzati poco o che presentano dei difetti portano ad avere un posto di lavoro disordinato, con conseguente perdita di efficienza. Se si applicano queste norme verrà semplificata la comunicazione tra il personale e verranno diminuiti i costi relativi alle operazioni che vengono rimosse. La seconda, è Seiton (set in order). Questa, consiste nel capire quale posto è il più adatto per un facile accesso ai materiali e agli strumenti necessari. Per far questo bisogna tener conto che si possono utilizzare scaffali nei quali posizionarci i materiali in ordine di importanza e armadi con cassetti e scatole di grandi dimensioni. Gli scaffali, gli armadi, i materiali e gli strumenti devono essere etichettati e in caso di cambiamenti delle dimensioni o del tipo di prodotto si utilizzano dei veicoli speciali per gli aggiustamenti della macchina. Si procede con Seiso (shine), che consente di realizzare specifiche attività tenendo un ambiente pulito e in cui ci si possa lavorare facilmente. Così facendo si riducono l'inefficienza, l'indisciplina e gli incidenti. Bisogna rimuovere lo sporco e la polvere perché sono le principali cause di mal funzionamenti e di corrosione della macchina da lavoro. Questo porta a migliorare il morale e le prestazioni del personale che può riconoscere immediatamente i problemi che si verificano, come ad esempio le perdite di oli o lubrificanti, con una conseguente riduzione del pericolo di incidenti. Questo lavoro di pulizia non può essere effettuato durante l'attività lavorativa in quanto si andrebbe in contro ad una perdita sostanziale di tempo. Per questo motivo, solitamente vengono eseguite all'inizio o alla fine del turno o nella pausa pranzo. Per poter eseguire le prime 3S vengono stabilite delle procedure e regole che i dipendenti sono tenuti a memorizzare. Queste, rappresentano la quarta S Seiketsu (standardize). È necessario dividere i posti di lavoro in aree in base alla presenza di una certa macchina

determinando per ciascuna un rappresentante. Inoltre, bisogna identificare i posti di lavoro da controllare formando degli elenchi dell'ordine di pulizia e rimuovere le problematiche riscontrate. L'ultima S, Shitsuke (sustain), consiste nell'insegnare le precedenti ai dipendenti cosicché diventino delle abitudini durante la giornata lavorativa. Questo compito viene affidato ad un leader, che ha il compito di formare un gruppo disciplinato, rimuovere piccoli difetti durante la pulizia, eseguire un controllo visivo, assicurare lo svolgimento delle attività in sicurezza e attribuire la responsabilità della macchina e del posto di lavoro al lavoratore.

Questa tecnica viene utilizzata in molte aziende manifatturiere nel mondo e porta ottimi risultati. Una scarsa comunicazione potrebbe creare disagi e ostacolare l'efficienza. Ecco perché le imprese investono molto sulla formazione e sul creare un ambiente motivante per i dipendenti (Singh et al., 2014).

1.4.2. Spaghetti diagram

Il diagramma o grafico degli spaghetti è un metodo che viene utilizzato per visualizzare e analizzare il movimento di un oggetto preso in esame. Questo può essere, ad esempio, un lavoratore o un materiale all'interno di un'area produttiva o di un ufficio. Per fare questo si creano una serie di linee, motivo per il quale è stato attribuito questo nome. In particolare, si può visualizzare il numero di movimenti alle diverse ore della giornata lavorativa, la loro lunghezza e i movimenti di incrocio e sovrapposizione. Infine, si possono eliminare tutti i problemi risultanti dall'analisi effettuata come, ad esempio, diminuire il numero di lavoratori o rimuovere i movimenti superflui e inefficienti (Senderská et al., 2017).

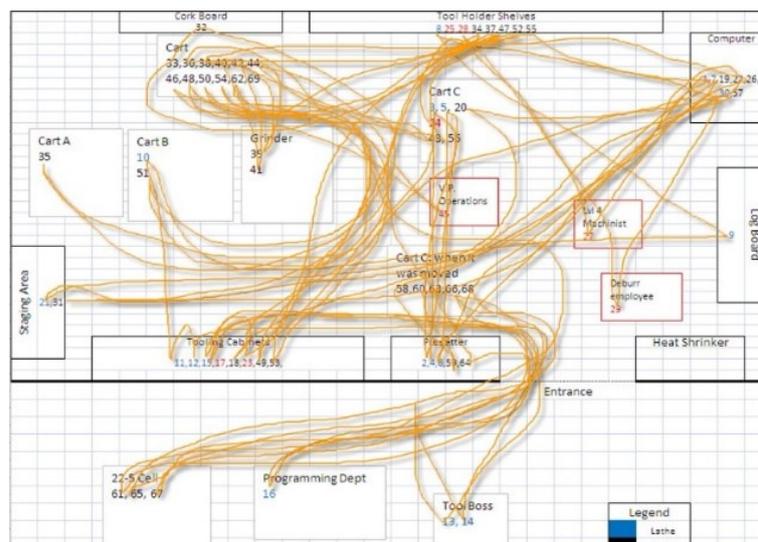


Figura3. Esempio spaghetti diagram

<https://americanlean.com/blog/use-a-spaghetti-diagram-to-capture-motion/>

1.4.3. Poka Yoke

Al centro della realizzazione di un prodotto, come già detto in precedenza, c'è la ricerca di una qualità elevata, andando a prevenire i possibili difetti derivanti da errori che possono essere commessi. La tecnica del poka yoke sviluppata da Shigeo Shingo nel 1961 ha proprio questo obiettivo. Infatti, la traduzione letterale del termine è resistenza agli errori causati da inattenzione. Alla base di questa tecnica ci sono il rispetto per i diritti umani del lavoratore e per la sua conoscenza in quanto a lui vengono affidati i compiti per la messa in pratica. Nella prima fase si analizza il processo in generale, identificando le caratteristiche fondamentali del prodotto come, ad esempio, le dimensioni, il peso e la forma. Successivamente si procede con il controllo, che va ad intercettare il difetto e interrompe la produzione per poter applicare immediatamente le correzioni opportune. Un altro approccio da seguire è quello di installare dei segnali che avvertano il lavoratore della presenza di un'anomalia. Si può optare per l'utilizzo di oggetti luminosi, come lampade, o di avvertenza sonora. L'applicazione di questa tecnica richiama il ciclo PDCA (Plan, do, check, act) del kaizen. Inizialmente, si vanno a selezionare i difetti che si sono creati, identificandone le cause. Successivamente, si cerca di trovare la metodologia poka yoke più corretta da utilizzare. Nella fase *Do* viene applicata la soluzione selezionata. Nella successiva, *check*, si devono raccogliere e analizzare i dati ottenuti precedentemente, documentando il tutto. Questo permette di capire se la metodologia adottata abbia avuto gli effetti sperati. Infine, una volta che si è arrivati alla causa, si possono applicare i vari miglioramenti, con l'obiettivo di prevenire e correggere la creazione di un determinato difetto (Dudek-Burlikowska, 2009).

1.4.4. Value stream mapping

Durante il processo di identificazione del flusso di valore si possono utilizzare degli strumenti Lean utili per la sua analisi. Uno di questi è il value stream mapping, che permette di visualizzare il processo nel flusso di materiali e di informazioni. Questo strumento permette di identificare gli sprechi, di prendere decisioni sul flusso e, in generale, di visualizzare cosa si sta facendo. In primo luogo, è necessario visualizzare la famiglia di prodotti da mappare. Con questo si intende identificare tutti quei prodotti che hanno lo stesso (o simile) processo produttivo e che impiegano gli stessi materiali. Per poterlo eseguire si può utilizzare una matrice che visualizzi i materiali e le lavorazioni eseguite per ciascun prodotto. Successivamente, va rappresentato graficamente lo stato attuale per poi sviluppare quello futuro e infine, inserire in una pagina tutte le informazioni relative alla strategia per poter raggiungere quello stato. La rappresentazione dello stato corrente (CSM) avviene eseguendo le seguenti attività.

Inizialmente è necessario rappresentare le richieste dei clienti. Per fare ciò, si utilizzano dei simboli (o icone) per indicare la fabbrica e un box con tutte le informazioni relative alle richieste. Successivamente, vanno disegnati i vari processi produttivi. Vengono rappresentati dei “process box” che indicano un’area del flusso dei materiali. Quest’ultimo viene rappresentato da sinistra verso destra nella metà inferiore della mappa ordinando le varie fasi di lavorazione. Sotto ogni box vengono inserite le informazioni riguardanti tempo ciclo, numero di persone, il tempo di set-up, tempo di lavoro disponibile per turno per i vari processi, l’affidabilità delle macchine, la qualità dei prodotti conformi rispetto al totale fabbricato e le dimensioni del lotto produttivo. Ora si deve mappare il flusso informativo. Si utilizzano delle frecce etichettate con una descrizione, che vengono rappresentate da destra verso sinistra nella parte superiore della mappa. Si aggiungono poi degli ulteriori box contenenti le informazioni sulle quantità da produrre e le tempistiche. I collegamenti vengono fatti con frecce a strisce che, in genere, seguono delle logiche push basate su previsioni. Sotto i box dei processi viene rappresentata la time line inserendo il lead time e il tempo di valore aggiunto per il cliente.

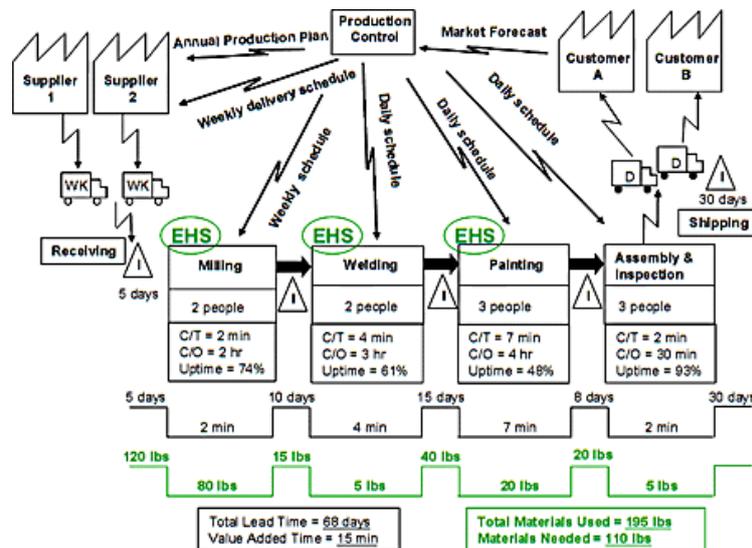


Figura 4. Esempio di un current state mapping

<https://www.leanmanufacturing.it/immagini/VSMcurrent.gif>

Ora va rappresentato lo stato futuro (FSM) per evidenziare le sorgenti di spreco ed eliminarle, trasformandolo in breve periodo nel nuovo stato corrente. L’obiettivo è quello

di ottenere una produzione il più vicino possibile a quella richiesta dal cliente. Le azioni da realizzare sono riportate di seguito.

Inizialmente, bisogna produrre a ritmo del takt time sincronizzando le vendite con la produzione ed evitando che si crei un livello di inventario alto. Questo permette di avere una risposta immediata ai problemi, eliminare le cause di fermi macchina non pianificati e minimizzare i tempi di set-up. Successivamente, si deve sviluppare dove possibile un flusso continuo. Questo significa che la realizzazione di un prodotto avviene passando da uno step a quello successivo, garantendo l'assenza di sprechi. A volte non è possibile creare dei flussi continui e bisogna ricorrere a metodologie pull o FIFO. Con il primo si evitano le previsioni e si conoscono con certezza le quantità richieste dal cliente. Vengono utilizzati dei kanban che permettono di produrre nella fase precedente quello richiesto in quella successiva, che preleverà la quantità di cui necessita. La tecnica FIFO si basa sul principio first-in-first-out. Questo permette di controllare il livello di inventario fermando la produzione quando le linee FIFO sono piene e il cliente non libera lo spazio acquistando. Poi, si cerca di inviare il programma di produzione, determinato in base alle richieste del cliente, ad un solo processo produttivo. Questo step viene anche chiamato sistema pacemaker in quanto andrà a determinare la produzione di tutti gli altri processi. Lo step successivo è livellare il mix produttivo, ovvero andare a distribuire la produzione dei vari prodotti in maniera corretta. Successivamente, è necessario livellare il volume di produzione. Per farlo, vengono mandate delle istruzioni relative alla quantità da produrre al processo pacemaker e allo stesso momento viene ritirata quella stessa quantità di prodotti finiti. Infine, vengono analizzati i cambiamenti e i miglioramenti che sono stati apportati, confrontandoli con i dati relativi allo stato attuale (Rother et al., 1999).

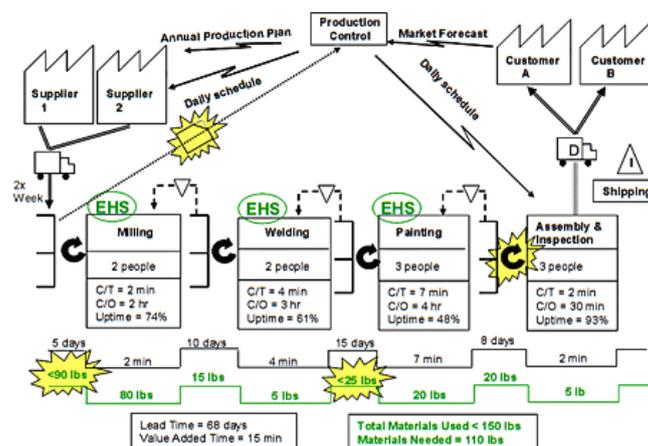


Figura 5. Esempio di un future state mapping

<https://www.leanmanufacturing.it/immagini/VSMfuture.gif>

1.4.5. Kanban

Il kanban è uno degli strumenti principali che caratterizza il pensiero snello e permette di controllare e regolare la produzione e il livello di inventario, riducendo le tempistiche e i work-in-progress.

Dal punto di vista pratico si tratta di cartellini di plastica che contengono tutte le informazioni necessarie per la realizzazione di un prodotto e che controllano il passaggio delle quantità da uno step al successivo. Se i processi non sono distanti tra di loro si può utilizzare un sistema di un solo kanban, altrimenti si opta per il sistema a kanban doppio.

In quest'ultimo sono presenti due cartellini:

- Il kanban di produzione (POK) che contiene le informazioni sulle quantità da produrre
- Il kanban di prelievo (WK) che indica la quantità da prelevare

Nel sistema a kanban singolo è presente solo il POK e il buffer funge sia da output per la stazione di lavoro a monte che da input per quella a valle.

Nel caso di un sistema a kanban doppio gli step che vengono eseguiti sono i seguenti. L'incaricato del prelievo della stazione di lavoro a valle si sposta verso quella a monte con il kanban di prelievo e lo inserisce all'interno del buffer di output. Successivamente, vengono ritirate le parti dall'output buffer e l'incaricato stacca i kanban di produzione e li attacca sulle unità fisiche e inserisce i kanban nel raccoglitore (POK-post). Ora la stazione a monte inizia la produzione su ordine dei kanban di produzione. Il contenitore con le unità fisiche e il kanban di prelievo si spostano alla stazione a valle. Vengono consegnate le parti al buffer di input e viene posizionato il kanban di prelievo nel raccoglitore. Infine, Quando tutte le unità fisiche del contenitore a valle sono state utilizzate, vengono ripetuti gli step precedenti. Quando il buffer di una stazione di lavoro è completamente pieno non possono essere rilasciate le parti e quindi, si sta verificando un blocco che può essere di vario tipo. Nel kanban singolo sono tre. Il primo è il blocco dovuto al tipo di parte che consiste nel fatto che il buffer può memorizzare un numero massimo di parti di un certo tipo, superato questo limite avviene il blocco per quel tipo di componente. Il secondo è il blocco dovuto alle dimensioni della coda che si verifica quando viene posto un limite sul numero di contenitori memorizzabili nel buffer indipendentemente dal tipo di componente. L'ultimo è il meccanismo di bloccaggio doppio, basato sull'applicazione contemporanea degli altri due. Nel kanban doppio oltre ai sopracitati sono presenti dei sistemi di blocco che vengono applicati sul movimento

dei materiali tra il buffer di output della stazione a monte e il buffer di input della stazione a valle. Per poter determinare il numero di kanban viene utilizzata la seguente formula, sviluppata dalla Toyota Motor Company (Kumar & Panneerselvam, 2007).

$$K \geq \frac{DL(1+\alpha)}{C}$$

D = domanda per unità di tempo
 L = lead time
 α = fattore di sicurezza

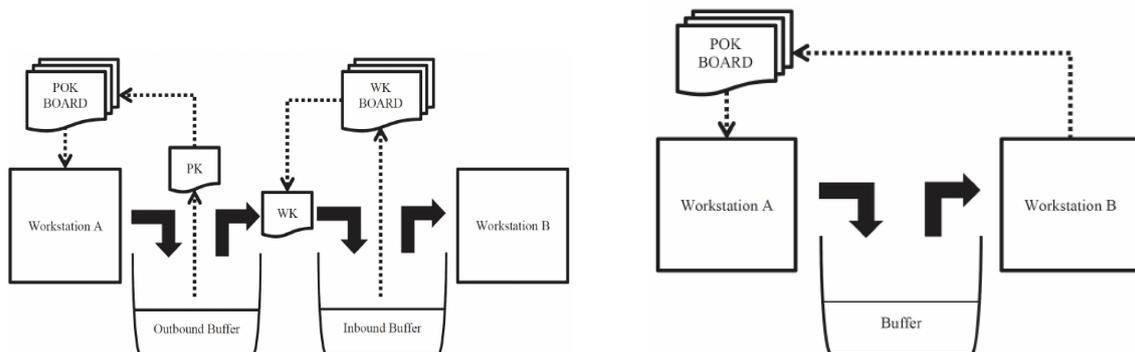
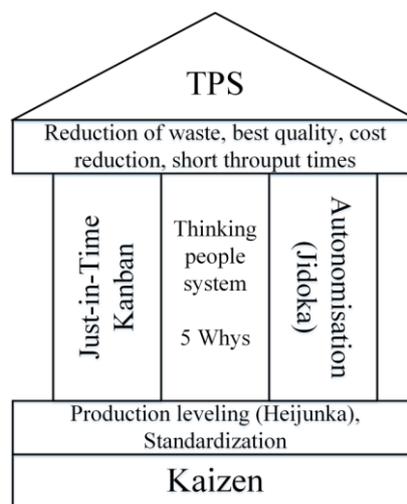


Figura 6. Schema di un sistema a kanban singolo e a kanban doppio

https://www.researchgate.net/figure/A-two-card-kanban-system_fig2_258028619

1.5. HOUSE OF LEAN

Tutti gli elementi sopra descritti che caratterizzano la filosofia snella possono essere rappresentati attraverso il modello chiamato “house of lean”, partendo dalle fondamenta fino ad arrivare agli obiettivi.



Source: Own illustration

figura 7. House Of Lean

Nella parte superiore della struttura si trovano gli obiettivi, ovvero l'eliminazione degli sprechi (MUDA), la ricerca della miglior qualità e la riduzione dei costi.

Le fondamenta sono formate da tre elementi principali: l'Heijunka, la standardizzazione e il kaizen. Con il primo si intende la livellazione della produzione, attraverso la quale è possibile visualizzare gli ordini e organizzare di conseguenza i processi produttivi. Gli obiettivi principali sono: la creazione di flussi di materiali e di informazioni, la creazione di processi lavorativi standardizzati ricercandone il continuo miglioramento, creare un piano di lavoro per gli operai e le macchine, minimizzare l'inventario e ridurre i costi. Per poter raggiungere gli obiettivi prefissati è necessario ottenere una standardizzazione delle attività lavorative. Queste operazioni sono basate su una sequenza di lavoro che spiega e descrive le fasi per la realizzazione dei compiti, il tempo ciclo, ovvero il tempo necessario alla creazione di un prodotto e il mantenimento di un livello di inventario standard, contenente la quantità minima necessaria di materiali. Un esempio di applicazione di questo principio è la tecnica delle 5S. Infine, si trova il kaizen che, come è stato descritto e approfondito precedentemente, rappresenta la ricerca di un miglioramento continuo.

Il cuore del modello lean viene rappresentato dal Just in time e dal concetto di Jidoka. Il primo si basa sul concetto che i materiali devono essere disponibili nella quantità corretta e al momento giusto, mantenendo un livello minimo di inventario e garantendo la massima qualità possibile. L'implementazione dei processi interni ed esterni avviene su richiesta del cliente, utilizzando una logica di tipo pull. Gli elementi principali che ne caratterizzano l'applicazione sono l'elaborazione integrata delle informazioni, la segmentazione della produzione e un approvvigionamento sincrono della produzione. La metodologia kanban rappresenta lo strumento utilizzato per il raggiungimento di questi obiettivi. Con Jidoka si intende il concetto di automazione che permette di fermare la produzione quando si verificano dei problemi, andando ad evidenziarne le cause. Questo permette di ottenere una maggiore qualità del prodotto, riducendo la creazione di difetti. I principali strumenti di prevenzione e risoluzione di problemi sono rappresentati dai poka yoke e da un sistema chiamato Andon. Quest'ultimo è composto da uno schermo in cui compare il tipo di problema riscontrato e da una luce che ne esprime la gravità. Si possono verificare i seguenti casi:

- Luce rossa che esprime un problema alla macchina
- Luce bianca che esprime la fine della produzione
- Luce verde che indica la carenza di materiali

- Luce blu ad indicare prodotti difettosi
- Luce gialla che esprime la necessità di un setup della macchina

(Fritze, 2016)

CAPITOLO 2: MANUTENZIONE INDUSTRIALE

2. IL CONCETTO DI MANUTENZIONE E LA SUA EVOLUZIONE NEL TEMPO

In accordo con la UNI EN 13306 la manutenzione viene definita come la combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali svolte durante il ciclo di vita di un'unità per poter conservare o recuperare il suo stato funzionale in modo da soddisfare le richieste lavorative. Da un punto di vista industriale rappresenta un fattore chiave per la redditività a lungo termine di un'azienda. L'obiettivo generale è quello di massimizzare la disponibilità e l'affidabilità delle risorse e delle attrezzature che prendono parte ad un processo produttivo creando profitto e rispettando le norme di sicurezza e ambientali. I pilastri fondamentali della manutenzione vengono descritti nella UNI EN 13306. Ogni componente, strumento o attrezzatura va definito con un item. Per ognuno può essere determinata la riduzione del margine di usura dovuto a processi chimici o fisici, il valore minimo del margine di usura e il margine d'usura posseduto in determinate condizioni. Tra le attività di servizio si possono trovare, ad esempio, la pulitura, la conservazione, l'oliatura, le varie azioni di cambio e di riadattamento che vengono utilizzate per ritardare il processo di degradazione. I processi di misurazione, di verifica e di monitoraggio vengono eseguiti per determinare le condizioni delle strutture o delle macchine. Infine, è necessario eseguire attività tecniche, amministrative e gestionali per aumentare l'affidabilità, la manutenibilità e la sicurezza. Negli anni il cambiamento e lo sviluppo tecnologico hanno portato ad un'evoluzione del concetto di manutenzione. Inizialmente le macchine e le attrezzature utilizzate nel lavoro avevano un periodo di vita utile determinato. Il processo di degradazione era considerato come un male necessario ai fini della produzione e si applicavano solamente azioni di sostituzione o riparazione delle parti guaste. Successivamente nacque l'idea di una manutenzione preventiva, applicando soluzioni tecniche. Tra gli anni '80 e '90 divenne parte del processo produttivo ed era caratterizzata da competenze tecniche e gestionali che avevano l'obiettivo di un miglioramento continuo. I Top manager delle aziende capirono che comportava un grosso impatto economico e finanziario e che una giusta strategia manutentiva poteva portare a risultati significativi in termini di profitto. Al giorno d'oggi un buon piano di manutenzione è imprescindibile se si vogliono raggiungere degli obiettivi rispettando al tempo stesso le norme ambientali e di sicurezza (Merkt, 2019; Pintelon et al., n.d.).

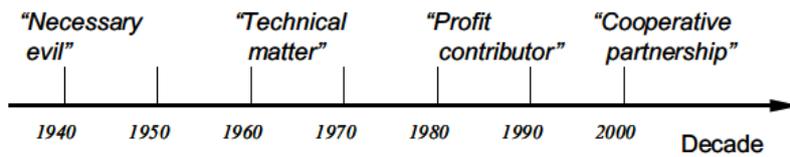


figura 8. Evoluzione del concetto di manutenzione

2.1. AFFIDABILITA'

Con il termine affidabilità si fa riferimento alla probabilità che una macchina o un sistema vada ad eseguire una determinata funzione per un periodo di tempo stabilito (t) e quindi, in altre parole, che non si verifichi un guasto di alcun tipo (Tsarouhas, 2012).

In termini matematici può essere espressa come:

$$R(t) = P(T \geq t) \quad \text{con } T \text{ il tempo tra un guasto e l'altro}$$

Di conseguenza l'inaffidabilità verrà espressa come la probabilità che si verifichi un guasto, ovvero:

$$F(t) = P(T < t)$$

E si otterrà la seguente uguaglianza:

$$R(t) + F(t) = 1$$

Conoscendo il valore dell'affidabilità e della densità di probabilità di distribuzione dei guasti $f(t)$ si può ricavare il tasso di guasto $\lambda(t)$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad \text{con} \quad f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

Infine, si potrà calcolare il MTBF (mean time between failure) come:

$$MTBF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

(Tsarouhas, 2012)

2.2. DISPONIBILITA'

La disponibilità viene definita come la capacità di una macchina di poter svolgere una determinata funzione in un periodo di tempo stabilito (t). È un concetto strettamente legato con l'affidabilità e la manutenibilità perché rappresenta la probabilità che attualmente la macchina non possieda dei guasti, anche se grazie ad interventi manutentivi (Tsarouhas, 2012).

La macchina si può trovare in uno stato di regolare operatività o potrebbe presentare un guasto e, normalmente viene descritto tramite un codice binario:

$$X(t) = \begin{cases} 1 & \text{quando è operativa} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Da un punto di vista matematico la disponibilità può essere espressa in tre modi:

- 1) Disponibilità istantanea

$$A(t) = P[X(t) = 1] \text{ se la macchina viene riparata}$$

Se la macchina non è in uno stato di disponibilità si avrà:

$$A(t) = R(t)$$

$$\bar{A}(t) = P[X(t) = 0] = 1 - A(t) \text{ probabilità di indisponibilità della macchina}$$

- 2) Disponibilità ad intervalli

$$A_m(t_2 - t_1) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt$$

3) Disponibilità a lungo termine

$$A_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTF} \quad \text{con} \quad \begin{array}{l} MTBF = \text{mean time between failure} \\ MTTF = \text{mean time to failure} \end{array}$$

(Tsarouhas, 2012)

2.3. STRATEGIE DI MANUTENZIONE

Scegliere il migliore approccio da applicare è di fondamentale importanza per ridurre i tempi di fermo macchina e i costi derivanti dalla manutenzione. Nella normativa EN 13306 vengono classificate le strategie manutentive in base ai tempi di intervento sui guasti che si verificano. Si parla principalmente di tre tipi di approcci: la manutenzione correttiva, preventiva e predittiva.

2.3.1. Manutenzione correttiva

La manutenzione correttiva basa il suo funzionamento sull' eseguire delle azioni dopo che si è verificato un guasto. Con questo si otterrà una riduzione dei costi riguardanti l'acquisto di nuove attrezzature e dei materiali. Gli svantaggi principali sono legati alla perdita di entrate, ai costi e ai tempi di riparazione delle attrezzature danneggiate e all' aumento dei tempi di fermo macchina non programmati. In generale, viene applicata per piccoli danneggiamenti o comunque di semplice riparazione e che non vadano ad interferire sul funzionamento di altre attrezzature. Nel caso di una produzione continua ci si potrebbe imbattere in problemi legati al funzionamento di alcuni elementi in uno stato difettoso. Questo viene caratterizzato da un lento processo di deterioramento e, quindi, difficile da individuare come, ad esempio, un aumento delle vibrazioni o del riscaldamento. Quando viene messa in pratica questa tecnica è di fondamentale importanza utilizzare tecnologie che vadano a rilevare tempestivamente i guasti e monitorino lo stato delle attrezzature e di conseguenza, procedere con la riparazione senza dover imbattersi in tempi di inattività troppo elevati.

2.3.2. Manutenzione preventiva

Lo scopo della manutenzione preventiva è quello di evitare tempi di inattività dovuti a guasti o alla degradazione delle macchine attraverso ispezioni e sostituzioni programmate. Vengono svolte, ad esempio, attività di lubrificazione, regolazione e cambio dell'olio. Con l'applicazione di questa strategia si potrebbero riscontrare degli effetti negativi come, ad esempio, che la sostituzione di una parte originale crei nuovi problemi dovuti ad errori di assemblaggio, difetti nascosti o di elementi non corrispondenti. Inoltre, oltre a presentare costi elevati, è necessario stabilire una pianificazione dei cambi. L'andamento del tasso di guasto, come mostrato in figura, è suddiviso in tre fasi. La prima zona presenta una riduzione, seguita da una costante (vita utile) e terminando con un aumento crescente che rappresenta la fine del ciclo di vita di un'attrezzatura.

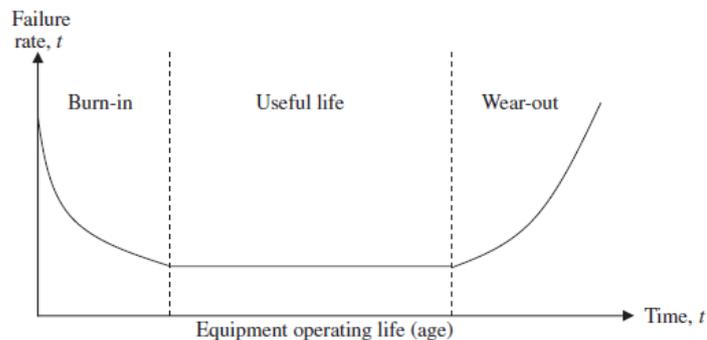


Figura 9. Grafico del tasso di guasto durante il ciclo di vita di un'attrezzatura

Per determinare gli intervalli nei quali eseguire ispezioni o sostituzioni vengono raccolti, inizialmente, i dati riguardanti i tempi relativi ai guasti. Successivamente, vengono eseguite delle analisi attraverso modelli statistici per studiarne le caratteristiche prendendo in considerazione, per esempio, il MTTF (mean time to failure). Lo strumento che viene utilizzato maggiormente è il modello di distribuzione Weibull caratterizzato dai parametri θ e β . Il primo indica "l'età operativa" del componente e il secondo le caratteristiche del ciclo di vita. Il mean time to failure viene determinato come:

$$MTTF = \theta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

con $\beta = \begin{cases} < 1 & \text{zona burn - in} \\ = 1 & \text{zona useful life} \\ > 1 & \text{zona wear - out} \end{cases}$

2.3.3. Manutenzione predittiva

Nella manutenzione predittiva vengono eseguite le attività manutentive quando sono richieste, prima che si verifichi un guasto. Si eseguono previsioni sulle prestazioni future della macchina attraverso delle analisi ripetute con il supporto di indicatori sugli stati attuali e passati del componente. L'applicazione di questa tecnica prevede una riduzione considerevole dei tempi di inattività programmati o non previsti. Le tecniche maggiormente utilizzate, basate su delle attività di misurazione periodiche, sono il monitoraggio delle vibrazioni, la termografia, l'analisi dell'olio e l'analisi acustica. La prima tecnica viene applicata ai macchinari in movimento e rotanti attraverso delle analisi dei livelli di vibrazione in particolari frequenze o sul profilo del segnale. Il rilevamento di segnali con anomalie consente di determinare la presenza di guasti come, ad esempio, le perdite di materiale. Inoltre, prevede l'installazione di strumenti di misurazione aggiuntivi e, di conseguenza, rappresenta una soluzione costosa. La termografia è una tecnica basata sull'utilizzo di strumenti che monitorano le emissioni infrarosse attraverso termometri a infrarossi, termocamere o scanner lineari. Può essere utilizzata per rilevare la diminuzione dello spessore della parete causata dalla corrosione o, in ambito agricolo, per determinare lo stato dei pannelli fotovoltaici. L'olio all'interno di una macchina è il responsabile del processo di lubrificazione, di raffreddamento, di pulizia, di protezione e di sigillatura. L'analisi generale della contaminazione dell'olio permette di poter pianificare azioni preventive di sostituzione o filtraggio. L'analisi acustica consiste nel monitoraggio dei rumori, degli ultrasuoni e dei segnali acustici attraverso degli strumenti poco costosi e in modo simile a come avviene con le vibrazioni, rilevando i guasti dovuti ad attriti o sollecitazioni (Ahmad & Kamaruddin, 2012; Molęda et al., 2023).

2.4. MANUTENZIONE E INDUSTRIA 4.0

Con il termine industria 4.0 si fa riferimento alla quarta rivoluzione industriale, che prevede l'uso di sistemi e servizi informatici (ICT) alla base dei processi manifatturieri. Venne introdotta per la prima volta nel 2011 alla Hannover Fair of Industrial Technologies e rappresenta l'evoluzione dei processi industriali computerizzati e automatizzati. L'obiettivo che si vuole raggiungere è la trasformazione dell'industria nella cosiddetta "smart factory" caratterizzata da processi produttivi ottimizzati. I 9 pilastri che ne rappresentano le basi sono: Industrial Internet of Things, i Big Data, i sistemi di integrazione orizzontali e verticali, la realtà aumentata, i Cloud Computing, i sistemi di simulazione, l'Additive Manufacturing, i Robot autonomi e la Cyber security. Questi strumenti svolgono un ruolo chiave nelle attività di manutenzione. Attraverso l'Industrial internet of things si riesce a stabilire una connessione via internet tra i sistemi fisici per lo scambio di dati. Questi consentono, attraverso dispositivi di input e output multisensoriali, di determinare delle previsioni sulle attività diagnostiche manutentive da utilizzare. Attraverso l'analisi dei Big Data si riescono a raccogliere delle informazioni sullo stato delle macchine, facilitando il processo di pianificazione della manutenzione e garantendo l'utilizzo di un approccio predittivo, limitando al massimo i tempi di fermo macchina. Vengono utilizzati degli algoritmi che prendono in considerazione varie informazioni provenienti dai diversi elementi della linea produttiva come, ad esempio, sulle macchine o sugli operatori, e infine forniscono delle linee guida sulla manutenzione. I sistemi di simulazione vengono utilizzati in vari campi nelle aziende manifatturiere e, in particolare, attraverso dei cambi dei dati e delle informazioni permettono di ridurre i tempi e i costi manutentivi. I sistemi di cloud computing rappresentano un supporto per le altre tecnologie, garantendo la condivisione di dati e informazioni grazie all' utilizzo di server, reti o altre applicazioni. Con l'utilizzo della realtà aumentata si può ottenere una guida dettagliata per le operazioni di ispezione e di creazione della documentazione tecnica con meno testo e più grafici. Lavorando con grandi quantità di informazioni e di dati diventano di necessaria importanza i sistemi di Cyber security per garantire un livello di sicurezza sia a livello hardware che software. Per l'implementazione di una manutenzione 4.0 viene utilizzata un'evoluzione dell'approccio predittivo, ovvero una strategia proattiva. Viene posta l'attenzione sulle cause del guasto, applicando delle azioni che ne anticipino la comparsa. Per poterlo fare si utilizzano degli algoritmi che permettono di acquisire i dati in tempo reale, trasmetterli, elaborarli e infine eseguirne un monitoraggio visivo. Un altro approccio che viene preso in considerazione è quello di una manutenzione autonoma, caratterizzata da un controllo continuo e non intrusivo.

Vengono utilizzate principalmente le tecnologie robot, permettendo di ridurre i costi e aumentare il grado di soddisfazione dei clienti. Per garantire l'utilizzo di queste nuove tecnologie si necessitano operatori formati, che sappiano interfacciarsi con dei sistemi digitalizzati e automatizzati. Di conseguenza, anche i lavoratori otterranno dei benefici, come, ad esempio, la diminuzione di lavori manuali e la possibilità di ottenere dei feedback in tempo reale. Da un punto di vista sociale, devono essere garantiti dei corsi di formazione e percorsi di orientamento gradualmente verso una nuova transizione tecnologica anche per le piccole e medie imprese. Bisogna far sì che gli operatori, soprattutto i più anziani, si abituino ai nuovi strumenti per non andare incontro ad effetti negativi e non redditizi (Silvestri et al., 2020).

2.5. TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE (TPM)

La TPM viene definita come una strategia manutentiva produttiva inizialmente introdotta dagli americani e in seguito modificata e adattata alla filosofia giapponese. È strettamente legata ai principi del just-in-time e della Lean production come la tecnica dei poka-yoke, delle 5s e Jidoka. Si cerca di ridurre al minimo tutte le perdite della produzione, riducendo a zero il tasso di difettosità dei prodotti. Sono stati identificati i “6 big losses” principali:

- Perdite dovuti a guasti
- Perdite dovuti a tempi di setup e relativi ad aggiustamenti da eseguire
- Perdite relative a interruzioni, come quelle dovute ad inceppamenti
- Perdite dovuti ad una velocità di lavoro della macchina minore rispetto alla teorica
- Perdite dovute a rilavorazioni e difetti di qualità
- Perdite dovute allo spreco di materie prime. Sono dovute principalmente dal metodo di produzione o dalle azioni di aggiustamento dei prodotti difettosi

Partendo da queste perdite sono stati definiti gli obiettivi della total productive maintenance, ovvero ottenere un valore minimo di OEE (Overall Equipment Effectiveness) del 90%, far funzionare le macchine anche durante la pausa pranzo, operare in modo tale da non ricevere delle contestazioni da parte dei clienti, ridurre i costi di produzione del 30%, ottenere il 100% di successo nelle consegne dei prodotti richiesti dai clienti e mantenere un ambiente privo di incidenti. Il Japan Institute of Plant Maintenance ha definito gli otto pilastri che caratterizzano la TPM, che hanno l'obiettivo di ottimizzare l'efficienza degli impianti e delle attrezzature grazie all'interazione tra uomo e macchina.

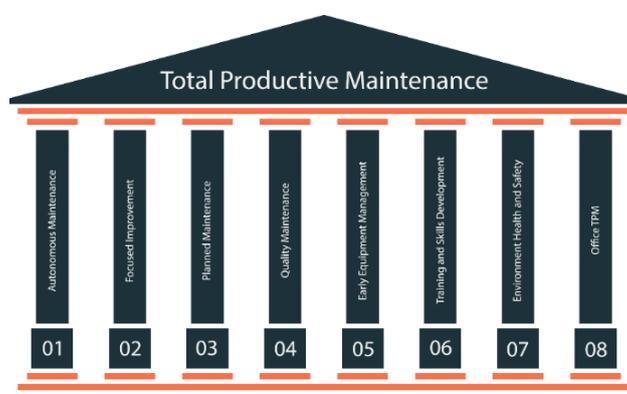


Figura10. I pilastri della TPM

<https://www.augmentir.com/glossary/what-is-total-productive-maintenance>

Nella manutenzione autonoma tutti gli operatori si prendono cura della propria attrezzatura eseguendo, ad esempio, la sostituzione di parti o l'oliatura e riescono a identificare tempestivamente le anomalie che si verificano risolvendole con azioni correttive. In questo modo si possono evitare che le attrezzature non funzionino, o che lo facciano in maniera poco efficace. È necessario eseguire una pulizia iniziale, eliminare le fonti di contaminazione, eseguire delle ispezioni generali e autonome e, in generale, raggiungere una standardizzazione delle attività.

Per quanto riguarda il miglioramento focalizzato, vengono svolte delle attività per ottenere la massima efficienza da parte di tutti i componenti di un dipartimento produttivo, riducendo a zero i difetti e le perdite del processo. Per far questo, si possono utilizzare svariate metodologie. La failure mode and effect analysis (FMEA) permette di identificare le potenziali modalità di guasto e i rischi ad essa associati ed eseguire azioni correttive. Si procede separando gli oggetti e i processi presi in esame e realizzando un'analisi qualitativa e quantitativa dei dati ottenuti. Si valuta l'affidabilità di ciascun componente e l'impatto dei difetti sul processo generale determinando la gravità di ogni guasto, la probabilità che si verifichi e la difficoltà di rilevamento. Nella pratica viene calcolata la priorità del rischio (RPN) come: $RPN = sicurezza \times probabilità \times rilevamento$. Un'altra metodologia che viene utilizzata è quella della Fault Tree Analysis (FTA) che utilizza un modello grafico e logico per descrivere le relazioni di più eventi che portano ad un guasto. Viene costruito dall'alto verso il basso con le cause che, collegate, portano all'evento che si verifica. Solitamente viene utilizzato come completamento della FMEA e rappresenta un supporto all'identificazione dell'affidabilità e alla determinazione della probabilità di avvenimento di ciascuna causa. Inoltre, permette di evidenziare le componenti critiche, valutare l'impatto e il rischio di possibili cambiamenti e di effettuare analisi quantitative e qualitative.

La pianificazione delle attività manutentive (manutenzione programmata) è necessaria per garantire che le attrezzature operino nelle migliori condizioni possibili in uno stato funzionale ottimo, limitando i costi. Per poter ottenere questo risultato, le attività di miglioramento individuale e focalizzato devono essere coordinate. Lo scopo principale è garantire al cliente dei prodotti che non presentino alcun tipo di difetto, mantenendone la qualità. Per questo, vengono eseguiti dei controlli e delle misure dei parametri che devono rientrare in valori standard in modo da prevenire i difetti. Questo permette di individuare le anomalie e di applicare tempestivamente azioni correttive. Un aspetto fondamentale viene rappresentato dalla formazione dei lavoratori. Ad esempio, quando

i tirocinanti vengono selezionati vengono stabiliti i loro bisogni formativi. Questa valutazione viene fatta sulle esperienze lavorative passate, su osservazioni quotidiane o sul desiderio di formazione del candidato. Vengono eseguiti insegnamenti giornalieri che si vanno ad aggiungere allo studio individuale, ai sistemi di coaching e alle chat. Potrebbe essere anche utilizzata una formazione svolta al di fuori dall'ambiente lavorativo. Infine, vanno ridotti al minimo gli incidenti, i problemi di salute e i danni all'ambiente. Garantendo ciò, si otterranno benefici anche negli altri pilastri riguardanti l'organizzazione del posto di lavoro, le ispezioni, la disciplina e la standardizzazione delle procedure lavorative.

Per poter individuare l'area che necessita di un miglioramento vengono utilizzati degli indici, come l'OEE (overall equipment efficiency). Matematicamente viene calcolato in funzione della disponibilità, del tasso di prestazione e del tasso di qualità, che sono alla base dei "6 big losses" (Kedaria & Deshpande, 2008; Taisir & Almeanazel, 2010).

$$OEE = \text{disponibilità} \times \text{tasso di prestazione} \times \text{tasso di qualità}$$

$$\text{disponibilità}(\%) = \frac{\text{disponibilità richiesta} - \text{tempi di inattività}}{\text{disponibilità richiesta}} \times 100$$

$$\text{tasso di prestazione}(\%) = \frac{\text{tempo operativo effettivo}}{\text{tempo operativo pianificato}} \times 100$$

$$\text{tasso di qualità}(\%) = \frac{\text{input di produzione} - \text{difetti di qualità}}{\text{input di produzione}} \times 100$$

CAPITOLO 3: ANALISI DELLA LETTERATURA

3.1. LA LETTERATURA ESISTENTE

Per poter condurre un'analisi corretta dell'argomento è stato necessario svolgere una revisione della letteratura scientifica esistente. Sono stati presi in esame 138 articoli dal database Scopus, utilizzando nella ricerca le parole chiave "Lean production and maintenance" e considerando gli studi pubblicati nel periodo 2020-2024 scritti in lingua inglese. Di questi, 74 risultano essere rilevanti, affrontando i temi fondamentali delle due metodologie. Principalmente, vengono trattate la relazione tra le metodologie Lean e la TPM, degli approcci manutentivi con riferimento all'indice OEE e i principali strumenti della filosofia snella. Di seguito, vengono presentati gli articoli sopra citati, andando ad approfondirne il contenuto diviso per tematica.

3.1.1. Lean production

In vari articoli viene condotta un'analisi generale della filosofia snella e delle metodologie che ne sono alla base, come evidenziato nei lavori di Terelak-Tymczyna & Niesterowicz (2024), Ahrabi & Darestani, (2024), Jokiel et al. (2023), Ravi et al. (2023), Sánchez-Rosero et al. (2023) e di Kalsi (2020). Nello studio di Valente et al. (2020) viene analizzato il modo in cui le metodologie Lean influenzano le prestazioni operative, finanziarie e commerciali delle piccole e medie imprese manifatturiere. Ad esempio, Punna Rao et al. (2020) descrive l'importanza dell'implementazione di tecniche snelle in un'industria manifatturiera di cinture di medie dimensioni. In particolare, si cerca di ridurre gli sprechi utilizzando strumenti Lean ed eliminando tutte le attività senza valore aggiunto. Nel lavoro di Sahoo (2020) viene presentato uno studio sull'applicazione di metodologie Lean, concentrandosi sui vantaggi e la loro difficoltà di applicazione in aziende automobilistiche peruviane. In particolare, vengono descritte la produzione cellulare, la manutenzione produttiva totale, le 5S, la standardizzazione del lavoro e le pratiche di gestione della qualità. Lo studio di Jayawardane et al. (2022) mira a valutare l'impatto delle pratiche di produzione snella sulle prestazioni di rotazione delle scorte, utilizzando gli strumenti caratteristici del JIT e TPM. Le ricerche di Makwana & Patange (2022) e Ruiz et al. (2020) mettono in risalto la tecnica delle 5S, facendo anche riferimento ad un miglioramento dei processi di manutenzione. Nello studio di Chambi Quiroz et al. (2022) viene eseguita l'analisi del processo di consolidamento minerale utilizzando il Value Stream Mapping (VSM) con il supporto delle 5S e della TPM. Il lavoro di Heravi et al. (2021) indaga gli effetti dell'implementazione dei metodi di mappatura del flusso di valore

(VSM), just in time (JIT), flusso continuo e manutenzione produttiva totale (TPM) durante i processi di produzione e montaggio di telai prefabbricati in acciaio. Nello studio di Quynh et al. (2020) viene proposta una progettazione ottimale di un buffer di stoccaggio in una linea produttiva composta da tre macchine. L'obiettivo è spiegare come una buona progettazione porti ad un aumento dell'efficienza, riducendo i tempi di fermo macchina.

Sono stati condotti vari studi anche sull'applicazione della metodologia Lean Six-Sigma, utilizzata per raggiungere quelli che sono gli obiettivi della produzione snella. Tra questi risultano più rilevanti quelli di Malvar & Chen (2023) e Makwana & Patange (2021). Per poterne spiegare e comprenderne meglio il funzionamento sono stati considerati dei casi di studio pratici, come mostrato dalla tabella 1.

articolo	Settore di applicazione	contenuto	Supporto di altre metodologie
Cornejo et al. (2023)	ceramica	indaga gli attuali assetti produttivi: identificando le cause dei ritardi, valutando la frequenza dei fermi macchina, proponendo soluzioni e metodi di controllo e sostenibilità	
Nguyen & Nguyen (2023)	plastica	vengono suggeriti dei miglioramenti da applicare	Seven Wastes, diagramma causa-effetto, diagramma di Pareto, 5S
Sudhakar et al. (2023)	Centrale elettrica	vengono raccolti e valutati i dati sulle materie prime in ingresso necessarie per un periodo di funzionamento	
Barriga et al. (2024)	Servizi	implementare, analizzare e valutare gli effetti della metodologia Lean Six Sigma (LSS) nel settore dei servizi	TPM

		per l'ottimizzazione dei processi	
Cortez et al. (2022)	idraulica	ridurre i tempi di fermo macchina e migliorare la produttività	5W2H, il diagramma di Ishikawa e 5S
de Oliveira Pantoja Freire et al. (2021)	ospedaliero	gestione e nel miglioramento del processo di igiene dei terminali ospedalieri	VSM e 5W2H
Vazquez Hernandez & Elizondo Rojas (2023)	Magazzino di un'azienda manifatturiera	riprogettare la gestione dell'inventario di pezzi di ricambio (MRO) presso il magazzino della Società XYZ	Cross Industry Standard Process for Data Mining.

Tabella1. Casi di studio della metodologia LSS

Il modello plan-do-check-act (DMAIC) risulta essere di fondamentale utilità per quanto riguarda l'eliminazione degli sprechi, la standardizzazione delle attività e il miglioramento dei processi produttivi, come si può notare nei lavori di Ferreira et al. (2022), Vazquez Hernandez & Elizondo Rojas (2023) e di de Oliveira Pantoja Freire et al. (2021). Nella ricerca di Morales-Mercado et al. (2023) viene proposto di implementare un modello di miglioramento incentrato sulla risoluzione dei problemi di manodopera e dei macchinari utilizzando il modello DMAIC, gli strumenti TPM e BPM e il lavoro standardizzato. L'applicazione di una produzione snella porta al raggiungimento di vari obiettivi, tra cui l'eliminazione degli sprechi, come evidenziato negli studi di Yücenur & Şenol (2021), Gillani et al. (2021), Palange & Dhatrak (2021) e Anes et al. (2023) e il miglioramento della produzione descritta nei testi di Al Mashkoor et al. (2022), Liberato-Arenas & Collao-Diaz (2022), Sundararajan & Terkar (2022), Lira-Aquino et al. (2021) e Real-Dominguez et al. (2021).

Queste metodologie, come si può notare nei lavori di Pozzi et al. (2024) e Ulhe et al. (2024), se supportate dalle tecnologie tipiche della quarta rivoluzione industriale possono portare a risultati ancora più positivi.

Un tema che in questo periodo storico interessa molto le aziende è senza dubbio la sostenibilità. In vari articoli viene condotto uno studio sul suo legame con gli obiettivi e

le metodologie lean, come risulta dagli studi di Díaz-Reza et al. (2024), Camones-Caballero et al. (2024), Ooi et al. (2023), Antosz et al. (2022) e Reza et al. (2021).

3.1.2. Manutenzione industriale

In alcuni articoli viene posta l'attenzione sulla "lean maintenance", come viene evidenziato nei lavori di Fernandes et al. (2024) e Arlinghaus & Knizkov (2020). Con questo, si può notare lo stretto legame presente tra le metodologie Lean e la manutenzione industriale, come riportato nella tabella2.

articolo	contenuto	Metodologie lean
Fernández-Marca et al. (2020)	propone lo sviluppo di un modello di produzione integrando la Manutenzione Pianificata con strumenti Lean nelle industrie del settore della plastica	5S, SMED, TPM
Aljuraiyed et al. (2023)	valutare la situazione attuale delle richieste di manutenzione per tre progetti residenziali	Six Sigma
Asian et al. (2023)	miglioramento dei tempi di consegna attraverso strumenti di Lean Manufacturing. Con l'utilizzo del software Arena è stato possibile ridurre il tasso di prodotti consegnati fuori tempo del 37,82%, aumentare l'OEE della macchina del 16% e ridurre i tempi ciclo	5S
Jimenez-Ballumbrosio et al. (2023)	mira a identificare, studiare e risolvere le principali cause che generano il problema della scarsa disponibilità	SMED, TPM e lavoro standardizzato

	nella linea di termoformatura di un'industria plastica in Perù	
Barbieri-Silva et al. (2022)	Strumenti per migliorare il funzionamento delle macchine. Successivamente, si stima che questo modello migliorerebbe l'efficienza OEE di una linea di produzione alimentare	5S, TPM e SMED
Quiroz-Flores & Vega-Alvites (2022)	viene proposto un modello di produzione snella in un'azienda dedicata alla produzione di materie plastiche mediante stampaggio a iniezione. Questo ha portato un aumento dell'OEE (Overall Equipment Effectiveness) del 13% e una riduzione dei tempi di set-up del 48%.	5S, SMED, TPM, Jidoka
Avila-Pisco et al. (2023)	sono state raccolte informazioni sul processo produttivo di un'azienda appartenente al settore tessile, con un OEE del 78,01% rispetto all'85,00% della media mondiale.	TPM, Poka Yoke
Flores et al. (2021)	descrive l'integrazione della standardizzazione dei processi con la Manutenzione Autonoma applicando lo strumento 5S, garantendone la sostenibilità nel tempo, riducendo la	5S e standardizzazione delle attività

	<p>variabilità del flusso dei processi e ottenendo così un aumento dell'efficienza produttiva nel settore dell'abbigliamento.</p>	
--	---	--

Tabella 2. Relazione tra manutenzione industriale e le metodologie lean

In particolare, è stata approfondita con grande attenzione la metodologia TPM (manutenzione produttiva totale), come viene descritto nei testi di Motuba & Telukdarie (2021), Cordova-Matias et al. (2023), G. Silva et al. (2024) e “9th AIC 2019 on Sciences and Engineering, AIC-SE 2019,” (2020). L’articolo di Schmidt & Schmidt (2023) mostra come i tour di trekking e arrampicata possano essere utilizzati per illustrare l'applicazione della logica PQCDMS (produttività, qualità, costi e consegna, sicurezza e salute, ambiente e morale) nell'alpinismo e come ciò possa essere trasferito alla pratica logistica e di manutenzione. In altri casi, si è fatto ricorso all'utilizzo dell'OEE per spiegarne gli effetti sull'efficienza, come evidenziato nei lavori di Gelaw et al. (2024), Jurewicz et al. (2024) e Smirnov & Abdilova (2021). Nello studio di Logeshwaran & Nachiappan (2022) si descrive l'implementazione del TPM misurando i risultati mediante l'OEE e l'efficacia del throughput (T E). Sulla base di ciò, per valutare l'efficacia di una linea di produzione con o senza inventario, è stata sviluppata l'efficacia complessiva della linea di produzione (O M L E). La TPM, negli studi di Díaz-Reza et al. (2022) e Crosby & Badurdeen (2022) è stata valutata in relazione al raggiungimento di un certo livello di sostenibilità. Il testo di Adzrie & Armi (2021) mira a valutare l'implementazione della pratica di produzione snella di Total Quality Management (TQM) e Total Productive Maintenance (TPM) nelle piccole e medie imprese (PMI) in Sabah. Nel lavoro di Pacheco-Colcas et al. (2022) viene presentato un modello basato su strumenti come la pianificazione sistematica del layout, la manutenzione produttiva totale e la standardizzazione per aumentare la produttività nelle aziende del settore alimentare. Altri studi hanno preso in esame la manutenzione preventiva, come risulta in quello di Sanchez et al. (2022), e la manutenzione autonoma descritta nella ricerca di Kose et al. (2023). Nel lavoro di Bazzan et al. (2020) vengono analizzati i difetti di un'impresa edile brasiliana e le azioni correttive che si potrebbero

applicare. Per fare ciò, viene utilizzato lo strumento fault tree analysis. Infine, nello studio di Pedersen & Haskins (2021) viene descritta l'implementazione di una manutenzione intelligente basata sull'utilizzo di tecnologie caratteristiche dell'industria 4.0.

3.2. CLUSTER ANALYSIS

Attraverso l'utilizzo del software VOSviewer è stato possibile creare delle mappe che mettano in luce i principali aspetti della bibliografia. In particolare, di seguito sono state riportate quelle relative alle parole chiave, agli autori ed alle organizzazioni in cui sono stati condotti il maggior numero di studi.

Nella figura 1. Vengono riportati gli autori che hanno contribuito maggiormente alle ricerche e agli studi su tematiche riguardanti la manutenzione industriale e la produzione snella. Dei 237 autori, vengono individuati quelli che presentano delle relazioni. Si può notare che Garcia-Alcaraz, Jorge Luis presenta il numero più alto di collegamento, con un valore di "total link strenght" pari a 12.

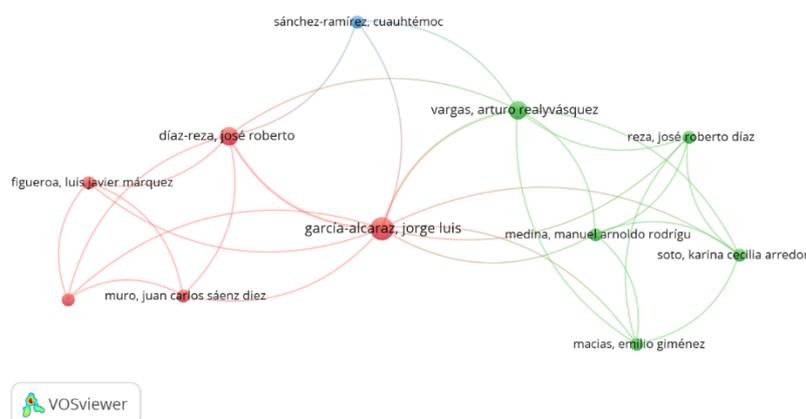


Figura 1. Co-authorship analysis

Nella mappa successiva (figura2.) vengono identificati i paesi da cui provengono la maggior parte degli articoli. Sono stati considerati tutti quelli da cui proviene almeno un documento e un numero massimo per articolo di 25. Come si può ben notare, in prima posizione si trova il Perù con un numero di documenti pari a 19 e un average publication year (avg. pub. year) uguale a 2022,32. A seguirlo si trovano il Portogallo con 7 documenti e un avg. pub. year pari a 2022,71. Con un totale di 3 articoli sono presenti gli Stati Uniti (avg. pub. year uguale a 2022,33) e la Malesia (avg. pub. year pari a 2021,67). Viene evidenziato anche che la maggior parte degli articoli è stata pubblicata nel periodo 2021-2023.

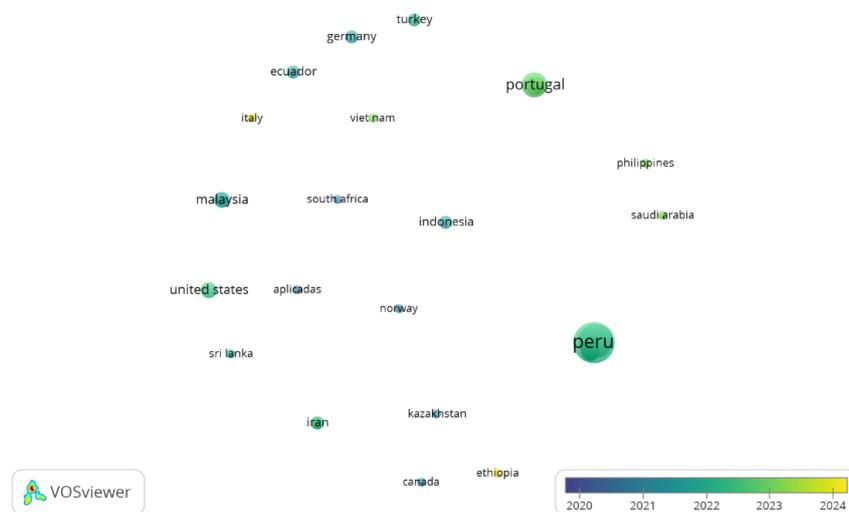


Figura2. countries analysis

Un altro fattore da mettere in luce riguarda le organizzazioni in cui sono stati eseguiti gli studi e le loro relazioni. Nella figura3. sono stati considerati come parametri la presenza di almeno un documento per ogni organizzazione che abbia almeno cinque citazioni. Risulta che il dipartimento Computer Science dell'università di Lleida e la Military university technology di Varsavia abbiano tre collegamenti con altre organizzazioni. Si può notare che alcune non presentano un'area di colore giallo, come il college di ingegneria dell'Iran cerchiato in rosso. Questo sta a significare che non presenta nessun collegamento con altre organizzazioni ma rispetta i parametri sopra elencati.



Figura 3. Organizations analysis

La prossima mappa (figura4.) mette in luce le parole chiave degli articoli selezionati, andando a identificare quelle che compaiono in almeno 5 studi. Su un totale di 678, sono state selezionate 42 parole e suddivise in 5 cluster (tabella 2.). Le più utilizzate sono “lean production”, usata 69 volte, “agile manufacturing system”, usata 28 volte, “total productive maintenance”, usata 27 volte e “maintenance” usata 22 volte. Si possono notare, tra le parole identificate, delle metodologie utilizzate nella produzione e manutenzione snella. In particolare, vengono evidenziate Six Sigma, la TPM, il miglioramento continuo, la manutenzione preventiva e le 5S.

cluster	Parola chiave	Total link strenght
1	Agile manufacturing system	171
2	maintenance	124
3	productivity	96
4	Lean production	365

Tabella 2. Risultati co-occurrences analysis

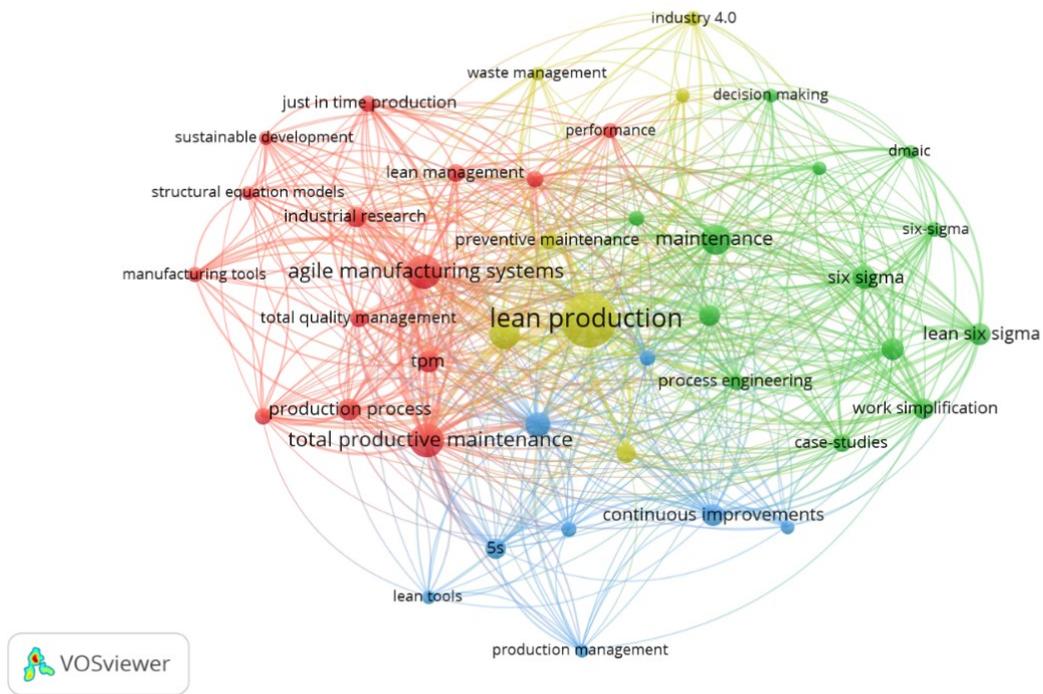


Figura 4. Co-occurrences analysis

CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi è stato redatto con lo scopo di illustrare i concetti principali della Lean production e della manutenzione industriale, andandone a ricavare ed analizzare i dati bibliografici.

Nei primi capitoli dell'elaborato vengono presentate le due metodologie da un punto di vista puramente descrittivo, cercando di spiegarne i principali aspetti.

Nell'ultimo capitolo è stata eseguita l'analisi della letteratura scientifica esistente. Sono stati selezionati gli articoli di recente pubblicazione dal database Scopus e, in seguito, sono stati selezionati i più inerenti agli argomenti trattati, per poi andarli a suddividere per tematica. Negli articoli relativi alla Lean production erano presenti vari studi di natura pratica che sono stati riassunti in una tabella, andando ad evidenziarne il contenuto e il settore di applicazione. Nella parte inerente alla manutenzione sono stati riassunti, sempre in una tabella, gli articoli che trattavano l'utilizzo di strumenti caratteristici della filosofia snella in ambito manutentivo.

Per poter eseguire un'analisi completa e dettagliata degli studi presi in considerazione, è stato utilizzato il software Vosviewer. Quest'ultimo ha permesso di creare delle mappe prendendo in esame diversi fattori relativi alla bibliografia, fornendo dei dati numerici da interpretare. Entrando più nello specifico, inizialmente si è posta l'attenzione sui legami esistenti tra gli autori dei vari articoli. Da questo, è emerso che Garcia-Alcaraz, Jorge presenta il valore più alto. In seguito, è stata eseguita un'analisi sui paesi da cui provenivano gli studi, concludendo che Perù e Portogallo rappresentano i più significativi. Lo studio continua prendendo in considerazione le principali organizzazioni relative alla pubblicazione degli articoli. Il capitolo termina con l'analisi delle parole chiave. La tabella riassume le più presenti, andando ad attribuirne un punteggio di "total link strenght". Si è potuto notare che le più importanti sono "Agile manufacturing system", "maintenance", "productivity" e "Lean production".

BIBLIOGRAFIA

- Adzrie, M., & Armi, M. A. S. M. (2021). The Awareness of Lean Manufacturing Implemented Practices in SME in Sabah State: TQM and TPM Practices Approach. *Journal of Physics: Conference Series*, 1878(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1878/1/012002>
- Ahmad, R., & Kamaruddin, S. (2012). An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers and Industrial Engineering*, 63(1), 135–149. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.02.002>
- Al Mashkooor, I. A. S., Mohammed, R. M. A., & Alkhafaji, A. A. K. (2022). THE ROLE OF LEAN PRODUCTION PRACTICES ON THE LOWER QUALITY COST AND HIGH PERFORMANCE OF MANUFACTURING FIRMS IN IRAQ. *International Journal of Economics and Finance Studies*, 14(4), 364–382. <https://doi.org/10.34109/ijefs.20220118>
- Aljuraiyed, O., Alzaeri, A., & Mejjauoli, S. (2023). Application of Lean Six Sigma to Reduce Maintenance Tickets Duration in Residential Facilities. *ACM International Conference Proceeding Series*, 181–185. <https://doi.org/10.1145/3587889.3588197>
- Antosz, K., Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Waszkowski, R., & Machado, J. (2022). Application of Lean Six Sigma for sustainable maintenance: case study. In B. Barbieri, D. Romero, C. Emmanouilidis, A. Parlikad, & S. Sepideh (Eds.), *IFAC-PapersOnLine* (Vol. 55, Issue 19, pp. 181–186). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.204>
- Asian, A. H., Cornejo, A. T., & Perez, A. F. (2023). Improvement in Delivery Times Using Lean Manufacturing Tools in a SME the Beverage Sector in Peru. In T. L.-C. (Ed.), *Advances in Transdisciplinary Engineering* (Vol. 35, pp. 699–707). IOS Press BV. <https://doi.org/10.3233/ATDE230097>
- Avila-Pisco, H., Chiok-Gonzales, D. A., & Flores-Perez, A. E. (2023). Application of TPM and Lean Manufacturing tools to increase OEE. An empirical investigation in the Peruvian textile industry. In J. P. H. Triana (Ed.), *2023 9th International Conference on Innovation and Trends in Engineering, CONIITI 2023 - Proceedings*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/CONIITI61170.2023.10324213>
- Barriga, A. L., Gonzales, M. G., & Ruiz-Ruiz, M. F. (2024). Lean Six Sigma and TPM for the Improvement of Equipment Maintenance Process in a Service Sector Company: A Case Study. In S. Sheu (Ed.), *Communications in Computer and Information Science: Vol. 2070 CCIS* (pp. 155–169). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56373-7_13
- Bazzan, J., Formoso, C. T., & Echeveste, M. (2020). Use of complaint records of maintenance departments for continuous improvement. *I GLC 28 - 28th Annual Conference of the International Group for Lean Construction 2020*, 1009–1020. <https://doi.org/10.24928/2020/0099>

- Chambi Quiroz, N. E., Chacón, J., & Prada, P. (2022). Proposal to Improve the Consolidated Copper Mineral in a Warehouse, Using Lean Manufacturing Tools. In V. F. J, de B. J. I, A. Leiras, P. C. S. A, G. A. M. D, C. A. González-Calderón, V. B. S, M. Rodríguez, & D. Ramirez-Rios (Eds.), *Springer Proceedings in Mathematics and Statistics* (Vol. 391, pp. 229–244). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06862-1_17
- Cornejo, J. R., Malipol, M. V, Imperial, H. M. M., Miguel, C. M., & De Jesus, N. M. (2023). Optimization of Machine Downtime Reduction: A DMAIC Approach in Ceramics Manufacturing Industry. *2023 24th International Arab Conference on Information Technology, ACIT 2023*. <https://doi.org/10.1109/ACIT58888.2023.10453835>
- Cortez, P. H., Baliga, B., & Shah, H. (2022). APPLICATION OF LEAN SIX SIGMA TO REDUCE THE DOWNTIME OF THE HYDROSTATIC TEST MACHINES. In G. Natarajan, E. H. Ng, P. F. Katina, & H. Zhang (Eds.), *ASEM 43rd International Annual Conference Proceedings* (pp. 511–520). American Society for Engineering Management. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85149177385&partnerID=40&md5=2ac2b1943ce48e4ec9f441e24785a67e>
- Crosby, B., & Badurdeen, F. (2022). Integrating Lean and Sustainable Manufacturing Principles for Sustainable Total Productive Maintenance (Sus-TPM). *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*, 6(1), 68–84. <https://doi.org/10.1520/SSMS20210025>
- De Minicis, M. (n.d.). *Povertà, Lavoro, Reddito nella produzione Post-Fordista Digitalizzata*.
- Díaz-Reza, J. R., García-Alcaraz, J. L., Figueroa, L. J. M., Vidal, R. P., & Muro, J. C. S. D. (2022). Relationship between lean manufacturing tools and their sustainable economic benefits. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(3–4), 1269–1284. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10208-0>
- Díaz-Reza, J. R., García-Alcaraz, J. L., Sánchez-Ramírez, C., & Vargas, A. R. (2024). Assessing the impact of Lean manufacturing on the Social Sustainability through Structural Equation Modeling and System Dynamics. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 18(1), 113–130. <https://doi.org/10.59038/jjmie/180109>
- Dudek-Burlikowska, M. (2009). *The Poka-Yoke method as an improving quality tool of operations in the process of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. <https://www.researchgate.net/publication/44385664>
- Fernandes, M., Correia, D., & Teixeira, L. (2024). Lean maintenance practices in the improvement of information management processes: a study in the Facility Management division. In F. Longo, W. Shen, & A. Padovano (Eds.), *Procedia Computer Science* (Vol. 232, pp. 2269–2278). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.046>
- Fernández-Marca, D., Mostacero-Rojas, K., Núñez-Ponce, V., Raymundo, C., Mamani-Macedo, N., & Moguerza, J. M. (2020). Lean Manufacturing Model of Production Management Under the Focus on Maintenance Planned to Improve the Capacity Used in a Plastics Industry SME. In J. I. Kantola, S. Nazir, & V. Salminen (Eds.),

Advances in Intelligent Systems and Computing: Vol. 1209 AISC (pp. 448–454). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50791-6_57

Ferreira, G. L., Vasconcelos, A. M., & Fogaça, D. R. (2022). Downtime Reduction in a Small Company Using DMAIC Methodology. In P. Sampaio, P. Domingues, A. Costa, M. Casadesus, F. Marimon, A. R. Pires, & P. Saraiva (Eds.), *International Conference on Quality Engineering and Management* (pp. 662–683). Universidade do Minho. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85137067218&partnerID=40&md5=68fed8b53b789464d74a18ba655a71e1>

Flores, H. S., Paucar, L. F., Castro, P., Marcelo, E., & Alvarez, J. C. (2021). Increased Efficiency in a Garment Sector by the Integration of Lean Manufacturing Tools. *2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM 2021*, 654–658. <https://doi.org/10.1109/IEEM50564.2021.9672821>

Fritze, C. (2016). *The Toyota Production System The Key Elements and the Role of Kaizen within the System*.

Gelaw, M. T., Azene, D. K., & Berhan, E. (2024). Assessment of critical success factors, barriers and initiatives of total productive maintenance (TPM) in selected Ethiopian manufacturing industries. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 30(1), 51–80. <https://doi.org/10.1108/JQME-11-2022-0073>

Hamed, M., & Soliman, A. (2017). A COMPREHENSIVE REVIEW OF MANUFACTURING WASTES: TOYOTA PRODUCTION SYSTEM LEAN PRINCIPLES. *Emirates Journal for Engineering Research*, 22(2), 1–10. <https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.9121283>

Heravi, G., Kebria, M. F., & Rostami, M. (2021). Integrating the production and the erection processes of pre-fabricated steel frames in building projects using phased lean management. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 28(1), 174–195. <https://doi.org/10.1108/ECAM-03-2019-0133>

Jastia, N. V. K., & Kodali, R. (2015). Lean production: Literature review and trends. *International Journal of Production Research*, 53(3), 867–885. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.937508>

Jayawardane, K., Musthaffa, S., & Dias, M. (2022). Impact of Lean Manufacturing on Inventory Turnover Performances: Evidence From the Sri Lankan Apparel Industry. *MERCon 2022 - Moratuwa Engineering Research Conference, Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/MERCon55799.2022.9906192>

Jimenez-Ballumbrosio, A., Rodriguez-Herran, D., & Castro-Rangel, P. (2023). Improvement Proposal to Increase the Availability of Machines in The Thermoforming Line of a Plastic Industry Applying TPM, SMED And Standardized Work Tools. *ACM International Conference Proceeding Series*, 395–402. <https://doi.org/10.1145/3629378.3629393>

- Kedaria, V. D., & Deshpande, V. A. (2008). International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Implementation of Total Productive Maintenance Methodology: A Review. In *Certified Journal* (Vol. 9001, Issue 4). www.ijetae.com
- Kose, Y., Muftuoglu, S., Cevikcan, E., & Durmusoglu, M. B. (2023). Axiomatic design for lean autonomous maintenance system: an application from textile industry. *International Journal of Lean Six Sigma*, *14*(3), 555–587. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-01-2022-0020>
- Kumar, C. S., & Panneerselvam, R. (2007). Literature review of JIT-KANBAN system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *32*(3–4), 393–408. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0340-2>
- Logeshwaran, J., & Nachiappan, R. M. (2022). Continuous Line Manufacturing System Effectiveness (OMLE) Evaluation and Improvement using Total Productive Maintenance and Lean Manufacturing with Real Case Studies. *International Journal of COMADEM*, *25*(3), 25–41. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85147328995&partnerID=40&md5=ed7519fbd38a057141ad24b7e9498770>
- Makwana, A. D., & Patange, G. S. (2022). Strategic implementation of 5S and its effect on productivity of plastic machinery manufacturing company. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, *20*(1), 111–120. <https://doi.org/10.1080/14484846.2019.1676112>
- Malvar, E., & Chen, N. (2023). Creating Continuous Improvement in Agile Software Development Using Lean Six Sigma. *Proceedings - 2023 Congress in Computer Science, Computer Engineering, and Applied Computing, CSCE 2023*, 2571–2578. <https://doi.org/10.1109/CSCE60160.2023.00412>
- Merkt, O. (2019). On the use of predictive models for improving the quality of industrial maintenance: An analytical literature review of maintenance strategies. *Proceedings of the 2019 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, FedCSIS 2019*, 693–704. <https://doi.org/10.15439/2019F101>
- Molęda, M., Małysiak-Mrozek, B., Ding, W., Sunderam, V., & Mrozek, D. (2023). From Corrective to Predictive Maintenance—A Review of Maintenance Approaches for the Power Industry. In *Sensors* (Vol. 23, Issue 13). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/s23135970>
- Morales-Mercado, G. N., Meza-Soto, L. M., & Quiroz-Flores, J. C. (2023). Increased productivity through a production management model with Lean Six Sigma (LSS) in the glass industry. *ACM International Conference Proceeding Series*, 148–154. <https://doi.org/10.1145/3587889.3587970>
- Motuba, T., & Telukdarie, A. (2021). AN ASSESSMENT OF TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE AND BEST PRACTICES THAT CONTRIBUTES TO A SUCCESSFUL PROGRAM: A COMPARATIVE CASE STUDY. *2021 ASEM Virtual International Annual Conference "Engineering Management and The New Normal,"* 546–555. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85124382389&partnerID=40&md5=decef218f7401ee862ba7e90e0faa024>

- Nguyen, T.-A.-T., & Nguyen, P.-T. (2023). Applying Tools of Lean-Six Sigma Method in the Plastic Products Industry: A Case Study. *2023 8th International Scientific Conference on Applying New Technology in Green Buildings, ATiGB 2023*, 163–168. <https://doi.org/10.1109/ATiGB59969.2023.10364470>
- Pacheco-Colcas, F. A., Medina-Torres, M. P., & Quiroz-Flores, J. C. (2022). Production Model based on Systematic Layout Planning and Total Productive Maintenance to increase Productivity in food manufacturing companies. *ACM International Conference Proceeding Series*, 299–306. <https://doi.org/10.1145/3568834.3568854>
- Pedersen, T. I., & Haskins, C. (2021). FRAMEWORK FOR THE IMPLEMENTATION OF SMART MAINTENANCE. In B. Castanier, M. Cepin, D. Bigaud, & C. Berenguer (Eds.), *Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference, ESREL 2021* (pp. 1347–1354). Research Publishing, Singapore. https://doi.org/10.3850/978-981-18-2016-8_083-cd
- Pintelon, L., Parodi-Herz, A., Pintelon, L., & Parodi-Herz, A. (n.d.). *Maintenance: An Evolutionary Perspective*.
- Pozzi, R., Cannas, V. G., & Rossi, T. (2024). Data Science Supporting Lean Production: Evidence from Manufacturing Companies. *Systems*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/systems12030100>
- Prošić, S., & Sc, M. (n.d.). *KAIZEN MANAGEMENT PHILOSOPHY*.
- Punna Rao, G. V, Nallusamy, S., Chakraborty, P. S., & Muralikrishna, S. (2020). Study on productivity improvement in medium scale manufacturing industry by execution of lean tools. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 48(1), 193–207. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.48.193>
- Quiroz-Flores, J. C., & Vega-Alvites, M. L. (2022). REVIEW LEAN MANUFACTURING MODEL OF PRODUCTION MANAGEMENT UNDER THE PREVENTIVE MAINTENANCE APPROACH TO IMPROVE EFFICIENCY IN PLASTICS INDUSTRY SMES: A CASE STUDY. *South African Journal of Industrial Engineering*, 33(2), 143–156. <https://doi.org/10.7166/33-2-2711>
- Quynh, D. V. X., Jeenanunta, C., Nakamura, M., & Kojima, F. (2020). The Optimal Initial Buffer and Cycle Time Design for Improving Lean Production Automation Line Efficiency. In K. Panuwatwanich & K. C.-H. (Eds.), *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 609–622). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1910-9_50
- Rother, M., Shook, J., Womack, J., & Jones, D. (1999). *LEARNING TO SEE VALUE STREAM MAPPING TO CREATE VALUE AND ELIMINATE MUDA*. www.lean.org
- Sahoo, S. (2020). Assessing lean implementation and benefits within Indian automotive component manufacturing SMEs. *Benchmarking*, 27(3), 1042–1084. <https://doi.org/10.1108/BIJ-07-2019-0299>
- Sanchez, S., Sanchez, L., & Viacava, G. (2022). Proposal to Improve the Dyeing Process Applying Preventive Maintenance, SMED and Standardization in an Industrial Dry

- Cleaner. *ACM International Conference Proceeding Series*, 426–430.
<https://doi.org/10.1145/3568834.3568887>
- Schmidt, S., & Schmidt, B. S. G. (2023). PQCDM-Logic in Maintenance (TPM) and Mountaineering. *Tehnicki Glasnik*, 17(3), 462–470. <https://doi.org/10.31803/tg-20230518082456>
- Senderská, K., Mareš, A., & Václav, Š. (2017). SPAGHETTI DIAGRAM APPLICATION FOR WORKERS' MOVEMENT ANALYSIS. *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, 79.
- Shah, R., & Ward, P. T. (2007). Defining and developing measures of lean production. *Journal of Operations Management*, 25(4), 785–805.
<https://doi.org/10.1016/j.jom.2007.01.019>
- Silvestri, L., Forcina, A., Introna, V., Santolamazza, A., & Cesarotti, V. (2020). Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103335>
- Singh, J., Rastogi, V., & Sharma, R. (2014). Implementation of 5S practices: A review. In *Uncertain Supply Chain Management* (Vol. 2, Issue 3, pp. 155–162). Growing Science. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2014.5.002>
- Singh, J., & Singh, H. (2009). *Kaizen Philosophy: A Review of Literature*. <http://afr.kaizen.com>;
- Sudhakar, T., Anjaneya Prasad, B., & Prahlada Rao, K. (2023). Analysis Six Sigma Implementation in Power Plants. In A. R. Manchuri, D. Marla, & V. V Rao (Eds.), *Smart Innovation, Systems and Technologies* (Vol. 334, pp. 247–259). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8497-6_25
- Taisir, O., & Almeanazel, R. (2010). *Total Productive Maintenance Review and Overall Equipment Effectiveness Measurement* (Vol. 4, Issue 4). www.jjmie.hu.edu.jo
- Terelak-Tymczyna, A., & Niesterowicz, B. (2024). Lean Manufacturing in Digital Transformation of Manufacture. In J. Trojanowska, A. Kujawińska, I. Pavlenko, & J. Husar (Eds.), *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 74–83). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56444-4_6
- Tsarouhas, P. (2012). Reliability, availability and maintainability analysis in food production lines: A review. In *International Journal of Food Science and Technology* (Vol. 47, Issue 11, pp. 2243–2251). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03073.x>
- Valente, C. M., Sousa, P. S. A., & Moreira, M. R. A. (2020). Assessment of the Lean effect on business performance: the case of manufacturing SMEs. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(3), 501–523. <https://doi.org/10.1108/JMTM-04-2019-0137>
- Vazquez Hernandez, J., & Elizondo Rojas, M. D. (2023). Improving spare parts (MRO) inventory management policies after COVID-19 pandemic: a Lean Six Sigma 4.0 project. *TQM Journal*. <https://doi.org/10.1108/TQM-08-2023-0245>

Yücenur, G. N., & Şenol, K. (2021). Sequential SWARA and fuzzy VIKOR methods in elimination of waste and creation of lean construction processes. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103196>