



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea

*Karakuri Kaizen per un'automazione sostenibile ed
efficiente nel Lean Management*

Relatore

Ch. mo Prof. Roberto Panizzolo

Laureando

Bolzonaro Marco

Anno Accademico 2023-2024

*“Cerca sempre quel raggio di sole
e di speranza per non arrenderti mai.”*

Ringrazio il Prof. Panizzolo per avermi dato l'opportunità di realizzare questo lavoro di tesi e per il supporto costante nella fase di stesura.

Grazie anche a tutte le persone con cui sono entrato in contatto durante questi anni universitari che mi hanno arricchito sia dal punto di vista umano che professionale.

Un particolare ringraziamento va ai miei genitori Fiorenzo e Monica, ai miei nonni Dario e Maria e alla mia fidanzata Eva, che mi hanno supportato e accompagnato in questo percorso di crescita ricco di sfide e altrettante soddisfazioni.

Si chiude un capitolo importante della mia vita che diventa un punto di partenza per scriverne di nuovi.

Sommario

L'approccio allo sviluppo tecnologico e all'automazione diffusosi con l'avvento di Industria 4.0, fortemente incentrato sull'aumento dell'efficienza produttiva industriale, è una condizione necessaria ma non più sufficiente nell'adozione delle soluzioni di automazione, in quanto le aziende devono considerare anche gli aspetti sociali e ambientali. Con l'evoluzione in corso di Industria 4.0 in Industria 5.0, questa tematica è sempre più rilevante sia all'interno dei contesti industriali che nei vari ambiti della società, trovandone riscontro anche nei quotidiani nazionali:

“Ad affiancare infatti l'Industria 4.0 è arrivato il anche il Piano di transizione 5.0 che mira a migliorare l'efficienza energetica di un'impresa e la sua sostenibilità. Attenzione ai consumi e la volontà di adottare politiche green sono diventate il tema intorno a cui ogni impresa è chiamata a confrontarsi” (Rampolla F., L'editoriale: l'uomo al centro, *Il Sole 24 Ore: Fare Network Professionisti e Imprese*, 8 Marzo 2024).

Questo lavoro di tesi dimostra come le semplici soluzioni di automazione realizzate mediante l'approccio Karakuri Kaizen, appartenente alla metodologia Lean della Low-Cost Automation, impattino in maniera positiva sia gli aspetti legati all'efficienza produttiva che quelli relativi alla sostenibilità, presentando tutte le caratteristiche per essere classificato come metodo di automazione alternativo. A supporto di questa tesi è stata realizzata un'approfondita ricerca bibliografica, che ha portato all'elaborazione di un modello teorico basato su 3 ambiti in cui l'approccio Karakuri Kaizen impatta: efficienza produttiva, consapevolezza e sostenibilità. Successivamente, attraverso l'analisi di 5 applicazioni industriali reali di soluzioni Karakuri, è stata effettuata un'analisi qualitativa e quantitativa dei benefici e delle limitazioni. Si è ottenuto un riscontro oggettivo in termini di aumento dell'efficienza produttiva nel 60% dei casi e miglioramento dei parametri di sostenibilità nel 40% dei casi; mentre per quanto riguarda la consapevolezza le valutazioni si limitano al piano qualitativo. Dunque, si è concluso come questo approccio rappresenti un metodo di automazione efficiente e sostenibile che si propone sia come alternativa che come soluzione a supporto della tradizionale automazione, inserendosi positivamente nel contesto di Industria 5.0.

Indice

Lista delle Figure	III
Lista delle Tabelle	V
Introduzione	- 1 -
CAPITOLO 1	- 7 -
DAL TOYOTA PRODUCTION SYSTEM AL LEAN MANAGEMENT	
1.1 CENNI STORICI.....	- 7 -
1.2 LA STRUTTURA DEL TPS	- 13 -
1.3 I PRINCIPI DEL LEAN THINKING	- 21 -
1.4 IL LEAN MANAGEMENT	- 26 -
CAPITOLO 2	- 29 -
L'AVVENTO DI INDUSTRIA 4.0	
2.1 INDUSTRIA 4.0: CENNI STORICI	- 29 -
2.2 LE CARATTERISTICHE PRINCIPALI DI INDUSTRIA 4.0.....	- 31 -
2.3 LE 9 TECNOLOGIE ABILITANTI.....	- 34 -
2.4 IL LEGAME TRA INDUSTRIA 4.0 E LEAN MANAGEMENT	- 40 -
CAPITOLO 3	- 51 -
LA TRANSIZIONE VERSO INDUSTRIA 5.0	
3.1 L'EVOLUZIONE DA INDUSTRIA 4.0 A INDUSTRIA 5.0.....	- 51 -
3.2 I VALORI FONDAMENTALI DI INDUSTRIA 5.0	- 54 -
3.3 IL RUOLO DEL LEAN MANAGEMENT NELLA SOSTENIBILITÀ	- 59 -
3.4 LOW-COST INTELLIGENT AUTOMATION	- 65 -
CAPITOLO 4	- 71 -
L'APPROCCIO KARAKURI KAIZEN	
4.1 ASPETTI INTRODUTTIVI E RICERCA BIBLIOGRAFICA	- 71 -
4.2 CENNI STORICI.....	- 78 -
4.3 PRINCIPI E MECCANISMI DI FUNZIONAMENTO DELLE SOLUZIONI KARAKURI.....	- 81 -
4.4 LINEE GUIDA PER L'IMPLEMENTAZIONE DEL KARAKURI KAIZEN.....	- 90 -
4.5 L'INTEGRAZIONE DELLE SOLUZIONI KARAKURI CON LE TECNOLOGIE 4.0	- 92 -
4.6 VANTAGGI E SVANTAGGI DELL'APPROCCIO KARAKURI KAIZEN	- 95 -
CAPITOLO 5	- 101 -
APPLICAZIONI REALI DI SOLUZIONI KARAKURI IN AMBITO INDUSTRIALE	
5.1 INTRODUZIONE AI CASI STUDIO.....	- 101 -
5.2 DISPOSITIVO KARAKURI PER LA GESTIONE DELLE MOVIMENTAZIONI IN UNA LINEA PRODUTTIVA.....	- 103 -
5.3 RACK DI FLUSSO KARAKURI PER LA MOVIMENTAZIONE NELLA LOGISTICA INTERNA	- 110 -
5.4 DISPOSITIVO KARAKURI PER IL POSIZIONAMENTO AUTOMATICO DI UDC A SCAFFALE	- 120 -
5.5 TRASPORTATORE KARAKURI APPLICATO A UN PROCESSO DI COTTURA	- 128 -

5.6	STRUMENTO DI RISOLUZIONE DELLE PROBLEMATICHE DI PROGETTAZIONE SECONDO L'APPROCCIO KARAKURI KAIZEN	- 133 -
5.7	EVIDENZE QUALITATIVE E QUANTITATIVE EMERSE DAI CASI STUDIO	- 138 -
	Conclusione	- 147 -
	Bibliografia	- 153 -
	Sitografia	- 153 -

Lista delle figure

Fig. 1.1 Evoluzione dei sistemi produttivi.....	- 2 -
Fig. 1.2 Modello automobile Ford T	- 5 -
Fig. 1.3 Classifica dei produttori di auto dal 1950 al 2002.....	- 7 -
Fig. 1.4 Il modello del Toyota Production System.....	- 9 -
Fig. 1.5 Il modello piramidale delle 4P	- 13 -
Fig. 1.6 Il modello del Toyota Production System ampliato con clienti, fornitori e dipendenti.....	- 15 -
Fig. 1.7 I 5 principi del Lean Thinking	- 17 -
Fig. 1.8 I 4 cicli di miglioramento per il successo dell'azienda	- 22 -
Fig. 2.1 Le rivoluzioni industriali.....	- 23 -
Fig. 2.2 Le 9 Tecnologie Abilitanti di Industria 4.0	- 29 -
Fig. 2.3 Pubblicazioni scientifiche dal 2015 sul legame Industria 4.0 e Lean Management	- 35 -
Fig. 2.4 Correlazioni parziali significative tra pratiche Lean e Industria 4.0	- 40 -
Fig. 3.1 I tre valori fondamentali di Industria 5.0.....	- 49 -
Fig. 3.2 Impatto dei metodi Lean nell'efficiamento energetico e delle risorse lungo la catena di fornitura.....	- 56 -
Fig. 3.3 Andamento dei costi d'investimento tra soluzioni di automazione tradizionali e LCIA	- 61 -
Fig. 3.4 Rapporto costi e benefici a confronto tra alta automazione e LCA	- 63 -
Fig. 4.1 Esempio di sistema modulare automatizzato tramite l'approccio Karakuri Kaizen.....	- 67 -
Fig. 4.2 Numero medio di pubblicazioni annue per periodo temporale	- 69 -
Fig. 4.3 Selezione delle pubblicazioni significative tra il 2017 e il 2023	- 69 -
Fig. 4.4 Numero di pubblicazioni raggruppate per nazione (a) e per natura (b).....	- 71 -
Fig. 4.5 Rappresentazione dell'automa "Bambola da tè".....	- 73 -
Fig. 4.6 Esposizione soluzione Karakuri alla fiera istituita dal <i>Japan Plant Maintenance Association</i> -	- 74 -
Fig. 4.7 Esempio di meccanismo ad altalena	- 77 -
Fig. 4.8 Esempio di meccanismo di arresto.....	- 78 -
Fig. 4.9 Esempio di meccanismo della puleggia	- 78 -
Fig. 4.10 Esempio di struttura realizzata con tubi tondi in acciaio $\phi = 28$ mm.....	- 79 -
Fig. 4.11 Esempio di struttura realizzata con tubi quadrati in alluminio 40x40 mm.....	- 79 -
Fig. 4.12 Esempi di giunto in acciaio rispettivamente per tubi tondi e quadrati	- 80 -
Fig. 4.13 Esempio di puleggia con cavo e sistema di contrappesi.....	- 81 -
Fig. 4.14 Esempio di binario a rulli con guida laterale.....	- 81 -
Fig. 4.15 Esempio di rastrelliera basculante FIFO realizzata mediante l'approccio Karakuri Kaizen ..	- 82 -
Fig. 4.16 Principio di funzionamento di una rastrelliera basculante FIFO	- 83 -
Fig. 4.17 Il ciclo del miglioramento continuo PDCA.....	- 84 -
Fig. 4.18 I benefici dell'approccio Karakuri Kaizen: un modello ciclico	- 93 -
Fig. 5.1 I 5 casi studio oggetto di analisi all'interno del modello ciclico	- 96 -

Fig. 5.2 Yamazumi Chart della line di assemblaggio secondaria con Takt Time = 180 s.....	- 98 -
Fig. 5.3 Sequenza di assemblaggio nella stazione 2 CB allo stato attuale	- 98 -
Fig. 5.4 Diagramma di Fishbone	- 100 -
Fig. 5.5 Risultato dell'applicazione della soluzione Karakuri.....	- 102 -
Fig. 5.6 Prima parte del movimento dell'applicazione Karakuri.....	- 102 -
Fig. 5.7 Seconda parte del movimento dell'applicazione Karakuri.....	- 103 -
Fig. 5.8 Mappatura dello stato corrente della movimentazione interna dei materiali.....	- 105 -
Fig. 5.9 Illustrazione e schema dello scaffale di movimentazione prodotti finiti nello stato attuale....	-106 -
Fig. 5.11 Scaffalatura realizzata mediante approccio Karakuri Kaizen	- 108 -
Fig. 5.10 Rappresentazione rispettivamente del sensore di pressione e del modulo di liberazione	- 107 -
Fig. 5.12 Esempio in commercio di dispositivo Karakuri a rilascio laterale integrabile su AGV	- 108 -
Fig. 5.13 Interazione tra il dispositivo Karakuri integrato nell'AGV e la nuova scaffalatura	- 109 -
Fig. 5.14 Mappatura della movimentazione interna dei materiali dopo l'implementazione delle soluzioni AGV e Karakuri	- 110 -
Fig. 5.15 Rack di flusso Karakuri per la movimentazione dei cartoni	- 111 -
Fig. 5.16 Sequenza delle operazioni effettuate dall'addetto al conteggio	- 112 -
Fig. 5.17 Trasporto dei cartoni di prodotto finito nella zona spedizioni	- 112 -
Fig. 5.18 Flusso delle attività di movimentazione nella linea produttiva	- 114 -
Fig. 5.19 Misurazioni antropometriche nello stato attuale	- 115 -
Fig. 5.20 Analisi REBA della situazione maggiormente critica allo stato attuale.....	- 116 -
Fig. 5.21 Rappresentazione schematica e reale della struttura del carrello Karakuri	- 119 -
Fig. 5.22 Esempio di allineamento del carrello Karakuri alla scaffalatura A.....	- 120 -
Fig. 5.23 Analisi antropometrica dopo l'implementazione della soluzione Karakuri	- 121 -
Fig. 5.24 Analisi REBA dopo l'implementazione della soluzione Karakuri.....	- 121 -
Fig. 5.25 Nuovo sistema forno con trasportatore Karakuri	- 124 -
Fig. 5.26 Esempio di carta Karakuri.....	- 128 -
Fig. 5.27 Fasi di sviluppo per una soluzione tecnologica.....	- 128 -
Fig. 5.28 Rappresentazione dell'output del Workshop Pilota	- 129 -
Fig. 5.29 Rappresentazione dell'output del Workshop A	- 130 -
Fig. 5.30 Configurazione finale delle carte Karakuri	- 131 -
Fig. 5.31 Soluzioni finali proposte dai due team.....	- 131 -
Fig. 5.32 Tipologia e quantificazione del legame tra soluzioni Karakuri e tecnologie 4.0	- 134 -
Fig. 5.33 Comparazione del livello dtificazione dei benefici nei tre ambiti.....	- 136 -

Lista delle tabelle

Tab. 3.1 Metodi Lean a supporto della sostenibilità	- 58 -
Tab. 4.1 Elenco dei riferimenti bibliografici oggetto di analisi	- 70 -
Tab. 5.1 Risultati quantitativi dell'attività di mappatura PAM.....	- 99 -
Tab. 5.2 Confronto dei parametri del processo dello stato AS IS con lo stato TO BE	- 103 -
Tab. 5.3 Tabella REBA per determinare score A	- 117 -
Tab. 5.4 Tabella REBA per determinare score B.....	- 117 -
Tab. 5.5 Tabella REBA per determinare score C.....	- 118 -
Tab. 5.6 Prestazioni del processo allo stato attuale.....	- 123 -
Tab. 5.7 Prestazioni del processo dopo le soluzioni di miglioramento	- 125 -
Tab. 5.8 Elenco di benefici e limitazioni dei casi studio oggetto dell'analisi	- 132 -
Tab. 5.9 Rilevazione della presenza di una componente quantitativa dei benefici	- 135 -

Introduzione

Il tema dell'automazione rappresenta da sempre un elemento fondamentale nei contesti produttivi e logistici. A partire dal 1870 con la II° Rivoluzione Industriale si assiste al passaggio dalla meccanicizzazione all'automazione delle linee di assemblaggio per la movimentazione dei materiali all'interno della fabbrica. È proprio grazie alla transizione verso l'automazione che, in questo periodo storico, nasce la produzione di massa, caratterizzata dal modello produttivo americano del *Ford's Production System* (Dilanthi, 2015). La produzione di massa porta all'introduzione della catena di montaggio, che riduce le movimentazioni degli operatori all'interno della fabbrica, riuscendo a ottenere elevati volumi produttivi e bassi costi di produzione, mediante l'accesso alle economie di scala. A partire dal 1950, le mutate condizioni della domanda di mercato richiedono logiche produttive maggiormente flessibili e personalizzabili. Sono queste condizioni a mandare in crisi il modello americano caratterizzato da un'elevata rigidità produttiva, che si sostiene solo mediante la produzione di una grande quantità di scorte. In questo contesto si afferma il nuovo modello giapponese diffuso dalla Toyota da cui prende il nome, il *Toyota Production System* (TPS), che fa emergere elementi innovativi quali la continua ricerca e lotta all'eliminazione degli sprechi, come ad esempio scorte e movimentazioni, e l'importanza del coinvolgimento e della responsabilizzazione di tutta la forza lavoro. Con il TPS inizia a diffondersi negli ambienti industriali il termine "Lean" ovvero "snello" (Krafcik, 1988). Questo modello inizia via a via ad affermarsi e viene studiato e implementato anche nel continente americano, dove ha origine quello che tutt'oggi rappresenta uno dei più affermati paradigmi produttivi, ovvero la *Lean Production* che, declinata in termini di gestione totale aziendale, prende il nome di *Lean Management* (Womack e Jones, 1997). Contestualmente allo sviluppo dei modelli produttivi, anche le tecnologie industriali iniziano a crescere in modo rapido. Tramite la III° Rivoluzione Industriale prima, con l'avvento di Internet e il passaggio dall'analogico al digitale, e la IV° Rivoluzione Industriale poi, si assiste a una spinta esponenziale all'automazione e alla digitalizzazione. Le tecnologie abilitanti, potenzianti l'efficienza produttiva, sono protagoniste di un'importante evoluzione che si

ripercuote nell'ambito della produzione industriale. L'essenza della IV° Rivoluzione Industriale, tutt'ora in corso, è racchiusa nel termine "Industria 4.0", diffusosi a partire dal 2011, che racchiude il concetto di "fabbrica intelligente". Quest'ultima rappresenta un sistema produttivo dove le nuove tecnologie digitali abilitano un'automazione flessibile, attraverso il miglioramento della comunicazione e connettività tra macchinari e prodotti, adattandosi a una domanda sempre più personalizzata e determinando, di conseguenza, un importante aumento di efficienza e produttività (Kumar e Kumar, 2020).

In questo contesto si inseriscono le nuove e crescenti sfide globali, che portano le aziende a dover ragionare ben oltre la mera efficienza produttiva, considerando aspetti finora posti in secondo piano riguardanti la sfera sociale e quella ambientale. A partire dagli anni duemila inizia a diffondersi il concetto di Industria 5.0, prima in Giappone nel 2017 con le dichiarazioni dell'ex Primo Ministro Shinzo Abe e successivamente in Europa nel 2021 attraverso l'approvazione da parte della Commissione Europea del documento "Industria 5.0: verso un'industria europea sostenibile, umano-centrica e resiliente" (Cappelozza e Dal Pozzo, 2023). Questo nuovo paradigma industriale, rimanendo pur sempre nei confini della IV° Rivoluzione Industriale, estende il concetto di Industria 4.0, portando allo sviluppo di un sistema produttivo collaborativo e incentrato sulle esigenze degli operatori, che rispetti l'ambiente e ponga il ruolo delle persone al centro dei processi produttivi (Reddy et al., 2024). Nel nuovo scenario caratterizzato dall'evolversi della transizione digitale in parallelo a quella energetica, le aziende sono portate a fare delle riflessioni a livello dei processi produttivi e logistici, tenendo in considerazione e interrogandosi in particolare sul ruolo dell'automazione e sul modo di implementarla nei processi.

Come far fronte a questo nuovo scenario in cui l'automazione dei processi produttivi e logistici non deve tener conto solo del fattore efficienza ma anche e soprattutto dei fattori sociali e ambientali?

Ancora una volta, come accaduto nel corso della storia industriale, all'interno della cassetta degli attrezzi del Lean Management è presente uno strumento che può coniugare queste nuove esigenze. Infatti, dai metodi di automazione Lean appartenenti alla *Low-Cost Automation* (LCA) emerge un particolare approccio che

consente di automatizzare i processi e va sotto il nome di Karakuri Kaizen (Bertagnolli, 2022). Il Karakuri Kaizen è un metodo per realizzare un'automazione, le cui origini risalgono al 1600 in Giappone, che nei principi di funzionamento trae ispirazione dalle bambole da spettacolo giapponesi dette “*Karakuri Ningyo*” o “*Automata*” (Kostrzewski e Nowak, 2022). Attraverso il Karakuri Kaizen è possibile realizzare soluzioni di automazione semplice e a basso costo, sviluppando progetti di miglioramento che portano alla creazione di dispositivi meccanici automatici semplici e creativi, che escludono l'impiego di fonti esterne come energia elettrica, pneumatica o idraulica e utilizzano solamente i principi fisici elementari quali gravità, elasticità, attrito o magnetismo. Questo approccio è particolarmente impiegato per automatizzare la movimentazione dei materiali e ottimizzare i processi in ambito industriale (Bhanu e Kumar, 2018).

Alla luce di queste premesse, il presente lavoro di tesi prende in considerazione la tematica di forte attualità racchiusa nel concetto di Industria 5.0: nello sviluppo delle tecnologie e in modo particolare dell'automazione le imprese devono rivedere il perseguimento degli obiettivi di efficienza produttiva, su cui finora Industria 4.0 ha fortemente spinto, in un'ottica maggiormente incentrata sulle tematiche di sostenibilità e umano-centrismo.

Nella letteratura scientifica si denota un aumento del grado di interesse verso il rapporto tra Industria 4.0 ed evoluzione in Industria 5.0, in particolare sul ruolo rivestito dal Lean Management e dalle pratiche di sostenibilità. Si riportano di seguito i principali riferimenti bibliografici da cui si traggono importanti considerazioni nello sviluppo del presente lavoro di tesi:

- Cappelozza F., Dal Pozzo G., 2023, L'industria per la società 5.0 – Verso una società Umano-centrica, Sostenibile e Resiliente, *MIT Sloan Management Review Italia*, n. 3, pp. 4-13.
- Dieste M., Panizzolo R., 2018, On the Relationship between Lean Practices and Environmental Performance, *9th International Conference on Environmental Science and Development*, IOP Publishing.
- Khuzaini., Irpan M., Shaddiq S., 2024, Industry 4.0 and Industry 5.0 - Inception, Conception, Perception, and Rethinking Loyalty Employment,

International Journal Of Economics, Management, Business and Social Science, vol. 4, n. 1, pp. 95–114.

- Reddy C.K.K., Anisha P.R., Khan S., Hanafiah M.M., Pamulaparty L., Mohana R.M., 2024, *Sustainability in Industry 5.0*, CRC Press, Florida.

L'obiettivo che si pone il presente elaborato, partendo dalla tematica appena illustrata, è quello di dimostrare come l'approccio Karakuri Kaizen rappresenti un metodo alternativo ed efficace per generare automazione, andando a risolvere problematiche di operatività quotidiana all'interno dell'ambiente industriale. Più nello specifico, intende approfondire come la realizzazione di soluzioni Karakuri concrete e semplici per il miglioramento dei processi possa impattare in maniera positiva sia gli aspetti riguardanti l'efficienza che quelli caratterizzanti i tre pilastri di Industria 5.0, rappresentati da umano-centrismo, resilienza e sostenibilità.

Il metodo risolutivo di cui si fa uso nella stesura del presente lavoro di tesi viene descritto in seguito.

Nella fase iniziale viene impostata la ricerca bibliografica, andando a rilevare nel database Google Scholar la presenza di pubblicazioni scientifiche collegate alla parola chiave "Karakuri" negli ultimi 30 anni, dal 1994 al 2023; da qui si ottiene una base di partenza di 1850 pubblicazioni. Suddividendo la distribuzione media del numero di pubblicazioni in cluster di 6 anni, si valuta di restringere la ricerca nel periodo più recente, dal 2017 al 2023, per il quale si approfondisce il legame tra le seguenti parole chiave "Karakuri + Kaizen + Industry 4.0 + Sustainability"; questo porta a restringere la ricerca a 37 pubblicazioni. Seguendo i criteri di completezza e quantificazione dei dati e delle informazioni trattate, attraverso un'analisi degli abstract e delle conclusioni, si selezionano infine 12 pubblicazioni ritenute particolarmente rilevanti.

Dall'analisi di queste 12 pubblicazioni, si giunge alla realizzazione di un modello teorico ciclico che racchiude i 3 ambiti su cui ha effetto l'approccio Karakuri Kaizen: efficienza produttiva, consapevolezza e sostenibilità.

Successivamente, il lavoro viene ulteriormente approfondito mediante l'analisi di 5 casi studio che trattano implementazioni reali di soluzioni Karakuri in ambito industriale, riconducendoli al modello ciclico.

Dalla trattazione dei casi reali poi si sviluppa un'analisi dei benefici e limiti delle soluzioni Karakuri e del loro legame con le tecnologie 4.0, che porta a una valutazione qualitativa e quantitativa dei benefici delle soluzioni Karakuri nei 3 ambiti del modello teorico. Queste valutazioni vengono poi portate a fattor comune, convertendo le relazioni identificate in termini percentuali, arrivando infine a una conclusione.

Per strutturare il lavoro di tesi si stabilisce una suddivisione in 5 capitoli: nel primo capitolo “Dal Toyota Production System al Lean Management” viene fornita un'approfondita descrizione della storia e dei principi del TPS arrivando all'origine del Lean Management; nel secondo capitolo “L'avvento di Industria 4.0” vengono descritte la storia e le caratteristiche della Quarta Rivoluzione Industriale, illustrando i forti legami con il Lean Management; nel terzo capitolo “La transizione verso Industria 5.0” vengono approfonditi i limiti di Industria 4.0, le tematiche inerenti alla sostenibilità e il ruolo della Lean nell'unire i due aspetti; nel quarto capitolo “L'approccio Karakuri Kaizen” viene trattato nel dettaglio il metodo Karakuri Kaizen, descrivendone principi, meccanismi di funzionamento e linee guida per l'implementazione e, a partire dall'impostazione della ricerca bibliografica, concettualizzando un nuovo modello teorico ciclico; infine, nel quinto e ultimo capitolo “Applicazioni reali di soluzioni Karakuri in ambito industriale” vengono analizzati nel dettaglio 5 casi studio, arrivando a quantificare gli impatti positivi e le limitazioni delle soluzioni Karakuri nei 3 ambiti del modello ciclico.

CAPITOLO 1

Dal Toyota Production System al Lean Management

Questo capitolo racconta come l'evoluzione dei sistemi produttivi ha portato il Toyota Production System (TPS) a diventare quello che oggi è conosciuto come Lean Management. Ripercorrendo il contesto storico che ha originato l'approccio Lean, vengono presentati la struttura fondante del TPS, i principi portanti della filosofia del Lean Thinking e, infine, la declinazione in Lean Management.

1.1 Cenni storici

Il modello del Toyota Production System rappresenta uno dei paradigmi produttivi maggiormente studiati negli ultimi decenni. Le caratteristiche del modello così come sono conosciute oggi, non sono le stesse rispetto a quando ha avuto origine; inoltre, si sono adattate nel corso del tempo spinte dall'evoluzione dei sistemi produttivi (Fig. 1.1).

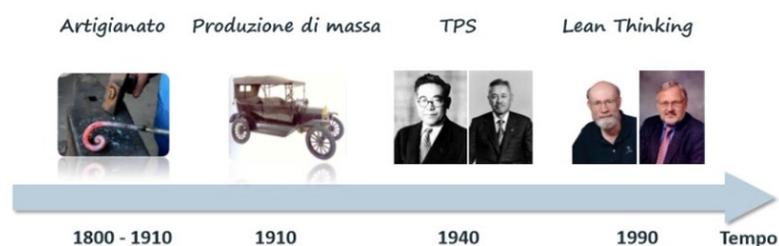


Fig. 1.1 Evoluzione dei sistemi produttivi (Fonte: Considi, 2023)

Agli inizi del 1800, i sistemi produttivi erano organizzati secondo logiche artigianali, fondate su un approccio amatoriale del lavoro. Le caratteristiche del modello sono, nella sostanza, la mancata suddivisione netta dei compiti, una produzione basata su bassi volumi e bassa varietà nei prodotti e l'assenza totale di automazione dei macchinari. Successivamente, alla fine del XIX secolo, l'ingegnere americano F. W. Taylor introduce l'organizzazione scientifica del

lavoro, che pone enfasi sulla suddivisione dei compiti e sulla standardizzazione delle attività (Dilanthi, 2015)¹.

In particolare, gli studi di Taylor si concentrano sulle esistenti procedure di lavorazione, andando ad analizzare scientificamente i tempi standard, al fine di identificare le principali operazioni elementari non a valore che causano uno spreco di tempo e sono, quindi, candidate come attività eliminabili. Inoltre, nell'organizzazione scientifica del lavoro secondo Taylor, da cui prende il nome il fenomeno del “*Taylorismo*”, il lavoratore inizia ad essere visto come un fattore produttivo di valore e, andando ad assegnare micro-cicli lavorativi differenti a seconda delle diverse caratteristiche individuali, risulta possibile aumentare l'efficienza produttiva (Panizzolo, 2022)². Questi cambiamenti significativi nell'approccio al sistema produttivo e la nuova visione della figura del lavoratore, gettano le basi della fase evolutiva successiva, ovvero la produzione di massa.

Dal 1910, iniziano a verificarsi importanti mutamenti delle condizioni economiche globali, determinate principalmente da due fattori: in primo luogo, grandi risorse di capitali sono sempre più concentrate nelle mani di alcune imprese; in secondo luogo, è richiesto un grande sforzo per la produzione bellica a causa dell'avvento della I e II Guerra Mondiale. In conseguenza a questi avvenimenti, a partire dagli Stati Uniti d'America, inizia a diffondersi il modello della produzione di massa.

La produzione di massa, al contrario della produzione artigianale, si caratterizza per volumi produttivi elevati con una varietà molto bassa, realizzata attraverso componenti standard, per andare a soddisfare una domanda altamente prevedibile. Nell'ambito della produzione di massa, la figura di riferimento è rappresentata da Henry Ford, a capo dell'omonima azienda automobilistica Ford Motor Company che, attraverso il *Ford's Production System* (FPS), rivoluziona il modo di produrre automobili all'epoca (Dilanthi, 2015). Da qui trae origine il fenomeno conosciuto come “*Fordismo*” che, a partire dagli studi realizzati in precedenza da F.W. Taylor, fonda il sistema produttivo sull'analisi dei tempi delle singole operazioni svolte dai lavoratori, con l'obiettivo di creare alcune specializzazioni per funzioni in modo da

¹ Dilanthi M.G.S., 2015, Conceptual Evolution of Lean Manufacturing, *International Journal of Economics, Commerce and Management*, vol. III, n. 10, pp. 574-585.

² Panizzolo R., 2022, Slide delle lezioni, *Insegnamento di Gestione Snella dei Processi, Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale, Università degli Studi di Padova, A.A. 2022/2023*.

organizzare le attività su misura, a seconda delle caratteristiche del lavoratore. Inoltre, il FPS mira ad eliminare gli eccessivi spostamenti dei lavoratori all'interno della fabbrica, introducendo il sistema altamente automatizzato della catena di montaggio. Questa rispecchia il concetto di flusso continuo, dove i macchinari sono posizionati uno in sequenza all'altro, in modo che siano i prodotti a muoversi e andare verso l'operatore, che rimane fermo a bordo linea. Così facendo, i componenti particolarmente pesanti vengono fatti muovere mediante la catena di montaggio, mentre i componenti più leggeri rimangono a disposizione dell'operatore a bordo linea. Tutto ciò determina la riduzione degli sprechi di tempo e di manodopera nella realizzazione di un prodotto, con un considerevole aumento di produttività. Questi concetti cardine della produzione di massa vengono ripresi e migliorati negli anni successivi, con l'avvento di nuovi paradigmi produttivi.

È importante evidenziare che il modello del *Ford's Production System*, su cui si basa la produzione di massa, è caratterizzato da elevati volumi produttivi, resi possibili da una rigida standardizzazione, sia dei prodotti sia dei processi. Il principale vantaggio è legato alla ripartizione dei costi fissi di produzione³ e dei costi di set-up⁴ su ampi volumi, permettendo così l'accesso a economie di scala che riducono il costo medio unitario. Tuttavia, una criticità del modello è riconducibile alla generazione di un'elevata quantità di scorte alla fine della catena di montaggio. Le decisioni del management, infatti, sono centralizzate e focalizzate sulla produzione della maggior quantità di prodotti nel minor tempo possibile, massimizzando quindi le economie di scala. Ne consegue che la produzione non risponde alla domanda di mercato, i prodotti attraversano la catena di montaggio "spinti" dalle previsioni di vendita, sulla logica di produrre la maggior quantità possibile. Da qui trae origine il metodo di risposta al mercato denominato "produzione push" (Considi, 2023)⁵.

L'elevata standardizzazione introdotta da Ford è ben rappresentata, da una sua celebre affermazione, riguardo al modello di automobile Ford T (Fig. 1.2):

³ Costi fissi di produzione: rappresentano i costi sostenuti dall'azienda, che sono indipendenti dai volumi prodotti (esempio: costo di gestione dell'ordine).

⁴ Costi di set-up: rappresentano tutte le attività complementari che partecipano alla realizzazione del prodotto (esempio: costo del fermo macchina per manutenzione).

⁵ Considi, www.considi.it/lean-thinking

“Ogni cliente può ottenere un’auto colorata di qualunque colore desideri, purché sia nero.” (Henry Ford, 1922).



Fig. 1.2 Modello automobile Ford T (Fonte: Wikipedia, 2024)

Nel frattempo che la produzione di massa inizia a diffondersi a ritmo veloce in Occidente, dall’altra parte del mondo in Giappone, nel 1937, nasce sotto la guida di Kiichiro Toyoda, la Toyota Motor Company, divisione automobilistica nata dalla Toyota Utomatic Loom⁶, che inizia a produrre il modello di automobile Model AA, ispirata al design delle auto americane. A partire dal 1950, nel primo dopoguerra, la mancanza di risorse e il cambiamento delle abitudini e motivazioni di acquisto negli utilizzatori di automobili, porta ad una variazione della domanda, che diventa frammentata e imprevedibile. Il modello di produzione Fordista non è progettato per funzionare efficientemente in tali condizioni di mercato, poiché necessita di elementi di stabilità dati da una domanda crescente e una bassa richiesta di varietà. Gli anni ‘50 vedono così la nascita di competitors, primo tra tutti General Motors, capitanato dalla figura di Alfred Sloan, che propone al mercato diversi modelli di automobili (Pontiac, Chevrolet, Cadillac, Oldsmobile, Buick) destinati a differenti segmenti di mercato; in contemporanea il Giappone inizia ad immettere nel mercato americano nuovi prodotti che riscuotono grande successo, poiché riescono a garantire alta qualità e varietà, mantenendo i costi bassi. Tutto ciò contribuisce a mandare in crisi il sistema occidentale Fordista, rendendo necessaria l’adozione di un sistema innovativo di produzione, in grado di rispondere a queste nuove condizioni di mercato (Panizzolo, 2022)⁷.

Proprio dal Giappone, infatti, arriva un nuovo modo di concepire la produzione che, mantenendo alcuni elementi del modello Fordista, riesce ad imporsi negli anni

⁶ Toyota Utomatic Loom: società principale della famiglia Toyoda fondata nel 1896 dal padre Sakichi Toyoda, produttrice di innovativi telai tessili.

⁷ *Ibidem*

avvenire. A seguito della II Guerra Mondiale, l'economia giapponese si trova in forte crisi a causa della mancanza di materie prime che non consente di perseguire i metodi della produzione di massa per garantire le economie di scala. Per ovviare a questa situazione e non rimanere esclusi dal mercato, i produttori giapponesi si trovano di fronte ad un apparente *trade-off*: riuscire a produrre di più utilizzando meno risorse.

Tra il 1950 e il 1960 Toyota passa sotto la guida di Eiji Toyoda. In questo periodo l'ingegnere Toyota Taichii Ohno, recandosi in America per una visita agli stabilimenti Ford, trae ispirazione dai metodi di rifornimento degli scaffali della catena americana di supermercati Piggly Wiggly, per fondare il modello del *Toyota Production System* detto anche TPS. Questo modello mantiene alcuni concetti del paradigma Fordista, quali il concetto di flusso e di standardizzazione, e si pone come obiettivo il miglioramento continuo dei prodotti e dei processi, attraverso l'eliminazione totale degli sprechi, mediante il coinvolgimento e la responsabilizzazione di tutta la forza lavoro (Kehr e Proctor, 2017)⁸.

Nel 1988 il consulente Toyota Shigeo Shingo, per rispondere alla domanda di mercato giapponese che si presenta piuttosto frammentata, nel pieno rispetto dei principi cardine del TPS, brevetta un nuovo metodo denominato SMED (*Single Minute Exchange of Die*), per ridurre i tempi negli attrezzaggi delle macchine, considerati tempi non a valore aggiunto verso il cliente. Attraverso questo metodo, Toyota riesce a contenere i costi di set-up riducendo fino a 10 minuti i tempi di attrezzaggio.

Come mostrato nella Fig. 1.3, nell'intorno di poco più di 50 anni, grazie a questo rivoluzionario metodo, Toyota riesce ad affermarsi rapidamente come produttore di automobili, passando da una produzione di meno di 2 milioni a più di 6 milioni di auto all'anno, insidiando così i maggiori produttori occidentali, General Motors e Ford.

⁸ Kehr T.W., Proctor M.D., 2017, People pillars: re-structuring the Toyota Production System (TPS) house based on inadequacies revealed during the automotive recall crisis, *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 33, pp. 921–930.

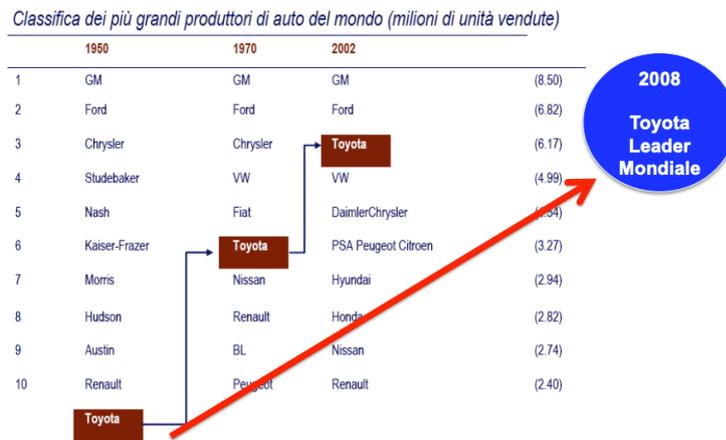


Fig. 1.3 Classifica dei produttori di auto dal 1950 al 2002 (Fonte: Panizzolo, 2023)

La crescita esponenziale della Toyota porta ad una reazione del mondo americano, accortosi dell'imminente inizio di una nuova era produttiva: a metà degli anni '80 gli istituti di studio americani quali il MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) iniziano a studiare il modello giapponese.

Attraverso gli studi effettuati dallo studioso americano Krafcik emerge come il modello di produzione giapponese TPS non sia legato esclusivamente a fattori specifici del territorio, bensì rappresenti una politica di gestione della produzione che può essere replicata anche altrove per sfruttarne le potenzialità (Krafcik, 1988)⁹. Proprio dal suo articolo "Triumph of the Lean Production System" emerge per la prima volta il termine "Lean" che si traduce in "Snello"; questo termine coniato da Krafcik segna l'inizio di un nuovo filone teorico.

La parola "Lean" viene poi ripresa e applicata alla produzione, come emerge dal libro "The Machine that Changed the World" di Womack, Jones e Roos, pubblicato nel 1990, che dà origine al termine "Lean Production". Con Lean Production si intende un sistema di produzione che usa meno risorse umane, riduce i tempi di lavorazione, impiega meno superficie dell'impianto produttivo e, soprattutto, minimizza le scorte (Womack e Jones, 1997)¹⁰. È evidente come i paradigmi alla base di questo nuovo approccio siano in antitesi con quelli della precedente produzione di massa.

⁹ Krafcik J. F., 1988, Triumph Of The Lean Production System, *Sloan Management Review*, vol. 30, n. 1, pp. 41.

¹⁰ Womack J.P., Jones D.T., 1997, Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation, *Journal of the Operational Research Society*, vol. 48, n. 11.

Nel 1996 gli stessi autori pubblicano un altro libro “Lean Thinking”, dove concettualizzano il sistema Lean attraverso 5 principi fondamentali per ottenere una produzione snella (Womack e Jones, 1997)¹¹:

- definire il valore del prodotto, analizzando cosa richiede il cliente finale
- identificare il flusso di valore, capendo quali sono le attività che portano valore al cliente
- fare scorrere il flusso, in modo che il processo che genera valore per il cliente sia veloce e costante
- implementare un sistema “Pull”, in modo che la produzione sia trainata dalla domanda del cliente
- ricercare la perfezione, tendendo ad un miglioramento continuo del processo produttivo.

Successivamente, questi principi si estendono ben oltre il solo ambito produttivo, facendo diventare la Lean una vera e propria filosofia di gestione totale dove, attraverso strumenti e tecniche, si creano le condizioni per portare un miglioramento continuo dei processi che generano valore per il cliente. Da qui nascono i termini come Lean Management, Lean Office, Lean Service, Lean Healthcare, riferiti a diversi ambiti implementativi, ma tutti fondati sui principi originari della filosofia Lean.

1.2 La struttura del TPS

Il modello del Toyota Production System (TPS), introdotto da Taichi Ohno nel settore automotive, rappresenta il vero precursore del Lean Management così come è conosciuto oggi. La sua struttura può essere rappresentata attraverso il modello denominato “Casa del TPS” (Kehr e Proctor, 2017)¹², come rappresentato in Fig. 1.4; viene rappresentato sotto forma di casa, per rispecchiare una struttura solida

¹¹ *Ibidem*

¹² *Ibidem*

dove tutte le parti che la compongono (le fondamenta, i pilastri e il tetto) devono essere tutte stabili e funzionali.

Osservando la Fig. 1.4 si può notare come il tetto della casa rappresenti gli obiettivi che il TPS si propone di raggiungere; per il conseguimento degli obiettivi sono necessari i due pilastri fondamentali su cui essi si reggono, ossia il concetto di “Just-in-Time” e di “Jidoka”; infine, le fondamenta sono costituite dai processi che necessitano di caratteristiche quali stabilità, robustezza e livellamento (Sugimori et al., 1977)¹³. Queste tre componenti ruotano intorno al nucleo centrale costituito dalla ricerca del miglioramento continuo, attraverso tecniche di coinvolgimento delle persone e di riduzione degli sprechi. Si analizzano ora più nel dettaglio le singole parti.

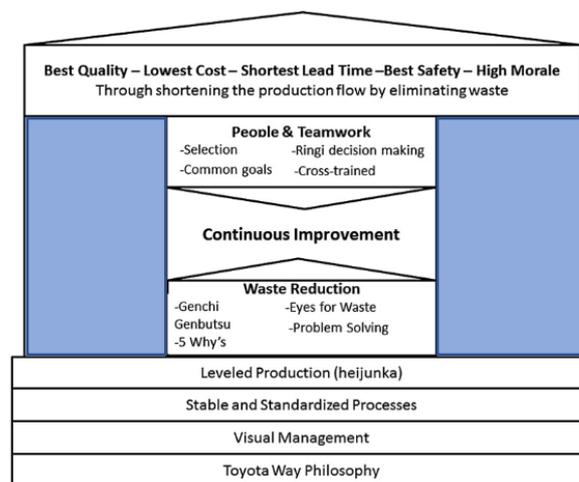


Fig. 1.4 Il modello del Toyota Production System (Fonte: Kehr e Proctor, 2017)

Il primo pilastro, rappresentato dal concetto di “*Just-in-Time*”, racchiude il tratto caratteristico del modello produttivo Toyota, ossia tutti i processi devono produrre la quantità necessaria di parti, nel tempo necessario e con le minime quantità di scorte funzionali a realizzare il prodotto. Questo permette di ridurre al minimo il livello delle scorte evidenziando da subito l’eventuale insorgenza di problemi di qualità, evitando squilibri nella quantità di attrezzature a disposizione degli operatori e riducendo il tempo di consegna.

¹³ Sugimori Y., Kusunoki K., Cho F., Uchikawa S., 1977, Toyota production system and Kanban system Materialization of just-in-time and respect-for-human system, *International Journal of Production Research*, vol. 15, n. 6, pp. 553-564.

Per mettere a terra il concetto di produzione “*Just-in-Time*” sono necessarie alcune premesse (Sugimori et al., 1977)¹⁴:

- tutti i processi devono conoscere tempi e quantità richieste dal processo a valle; ciò rende necessaria un’inversione della classica logica secondo cui il processo precedente fornisce le parti al processo successivo, poiché diventa il processo a valle che “tira” le parti dal processo a monte creando il flusso continuo (produzione *Pull*);
- tutti i processi possono produrre e trasportare un solo pezzo alla volta seguendo il ritmo della domanda proveniente dal cliente (*One Piece Flow*); attraverso la riduzione dei tempi di set-up, questo permette la minimizzazione delle scorte tra i diversi processi, in quanto non è consentito produrre una quantità maggiore di quella richiesta;
- tutti i processi devono essere livellati rispetto alla linea di assemblaggio finale, che rappresenta il processo più importante rispetto al quale partono gli input per i processi a monte; vengono quindi prodotte le parti a seconda della quantità venduta, permettendo così un sistema di schedulazione flessibile che consente di adattarsi alle fluttuazioni del mercato, regolarizzando la produzione;
- le scorte dovute alla sovrapproduzione devono essere eliminate, in quanto aumentano i costi di produzione e nascondono implicitamente problematiche non risolte, come ad esempio squilibri tra i diversi processi oppure tempi di inattività degli operatori.

La realizzazione fisica della produzione “*Just-in-Time*” è resa possibile attraverso l’implementazione del Kanban System. Questo sistema di gestione dei materiali, nella forma più classica, si realizza attraverso due cartellini attaccati ai contenitori di materiale in produzione: il primo, detto “Kanban di trasporto”, viene trasportato quando si passa da un processo al precedente; il secondo, detto “Kanban di produzione”, serve per far partire la produzione della parte prelevata dalla lavorazione successiva. I benefici di questa metodologia sono legati a un rapido scambio di informazioni, una riduzione del costo di elaborazione delle stesse ai fini

¹⁴ *Ibidem*

della schedulazione e, infine, una comprensione rapida e visuale del livello delle scorte, che viene mantenuto al minimo.

Il secondo pilastro è rappresentato dal concetto di “*Jidoka*” che si traduce con “*Automazione con un tocco umano*”, secondo cui un macchinario o una attrezzatura devono interrompere istantaneamente e in modo automatico la lavorazione in atto, ogni qualvolta si presenti un difetto o un malfunzionamento e si raggiunga la quantità da produrre richiesta (Dilanthi, 2015)¹⁵. Il principio dello *Jidoka* assegna all’operatore la possibilità di fermare la produzione della linea, segnalando attraverso un pulsante la presenza di un problema: questa pratica prende il nome di “*Andon*” che significa “luce” (Kehr e Proctor, 2017)¹⁶. Attraverso questo metodo, Toyota riesce a mettere al centro del processo di miglioramento l’operatore, sfruttare appieno le sue capacità e responsabilizzarlo. Essendo implementato nel livello più basso dell’organizzazione, permette una rapida risposta all’insorgenza dei problemi, che vengono analizzati alla causa radice. Inoltre, riesce a facilitare l’emergere di anomalie, con conseguente generazione di un maggiore grado di qualità intrinseca nel processo e minimizzazione degli sprechi da sovrapproduzione. In altri termini, attraverso la possibilità di fermare la linea in caso di malfunzionamenti, gli operatori partecipano attivamente al processo produttivo, evitando che i difetti si propaghino verso le fasi a valle. Inoltre, la possibilità di interrompere la produzione una volta raggiunta la quantità richiesta, consente di ridurre gli sprechi di movimentazioni eccessive dovute allo spostamento di materiali da parte degli operatori. Infine, l’automatizzazione delle attività che risultano ripetitive e alienanti, permette di slegare l’operatore dal singolo macchinario, assegnandolo alla supervisione di più macchinari, con conseguenze in termini di riduzione dei tempi di ozio e aumento dell’utilizzo delle capacità dello stesso.

Da questo pilastro emerge in modo chiaro l’importanza che Toyota attribuisce alla figura dell’operatore, sia in termini di sicurezza lavorativa che considerandolo una risorsa importante e centrale nel processo di miglioramento continuo dell’organizzazione.

¹⁵ *Ibidem*

¹⁶ *Ibidem*

I due pilastri portanti di tutta la struttura della casa del TPS, si reggono sulle fondamenta dei principi del cosiddetto “*Toyota Way*”, che consentono di ottenere processi stabili, robusti e livellati.

Esso è costituito da 14 buoni principi che guidano tutti gli stabilimenti Toyota che applicano il modello del TPS e definiscono i capisaldi della cultura Lean. I principi del *Toyota Way* sono enunciati di seguito (Kehr e Proctor, 2017)¹⁷:

1. Basa le decisioni gestionali su una visione a lungo termine anche a scapito degli obiettivi finanziari del breve periodo;
2. Crea un processo continuo a flusso in modo da portare in evidenza i problemi;
3. Implementa un sistema di produzione ‘Pull’ per evitare la sovrapproduzione;
4. Livella il carico di lavoro (*Heijunka*);
5. Costruisci una cultura della qualità che porti a fermarsi per risolvere i problemi, in modo da ottenere la qualità corretta al primo tentativo;
6. Standardizza e misura le attività che sono alla base per il miglioramento continuo e la responsabilizzazione dei dipendenti;
7. Usa sistemi di controllo visivi in modo che nessun problema sia nascosto;
8. Usa per i tuoi processi solo tecnologie che siano testate e affidabili;
9. Cresci leader che capiscano a fondo il lavoro, vivano questa filosofia e la trasmettano agli altri membri;
10. Sviluppa persone e team eccezionali che seguano la filosofia dell’azienda;
11. Rispetta la rete di collaboratori e fornitori attraverso la sfida e l’aiuto a migliorare;
12. Va a vedere di persona la situazione per comprenderla a fondo (*Genchi Genbutsu*);
13. Prendi decisioni lentamente considerando tutte le opzioni e, poi, implementale velocemente (*Nemawashi*);

¹⁷ *Ibidem*

14. Diventa un'organizzazione che impara attraverso la riflessione (*Hansei*) e il miglioramento continuo (*Kaizen*).

A loro volta, questi 14 principi possono essere suddivisi e distribuiti nel modello a piramide delle “4P”, come riportato in Fig. 1.5, costituito da 4 diversi livelli. Partendo dalla base, i livelli sono destinati alla filosofia aziendale (*Philosophy*), ai processi (*Process*), alle persone e collaboratori (*People and Partners*) e, infine, alla risoluzione dei problemi (*Problem Solving*). Per ognuno di questi livelli, varia il focus dei principi assegnati (Kehr e Proctor, 2017)¹⁸.

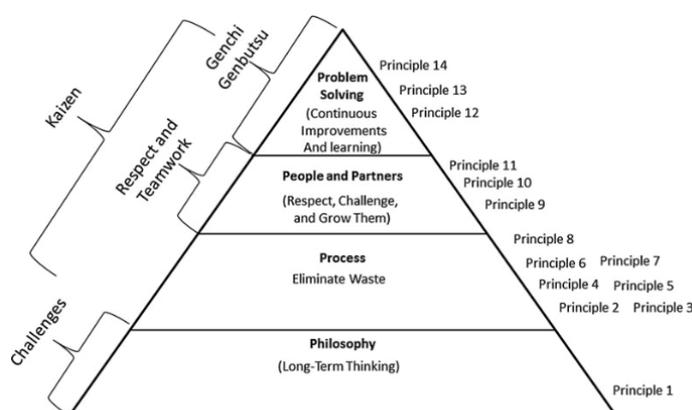


Fig. 1.5 Il modello piramidale delle 4P (Fonte: Kehr e Proctor, 2017)

Alla base della piramide, sono racchiuse le sfide che l'organizzazione affronta attraverso una mentalità fondata sul pensiero di lungo termine, che corrisponde al primo principio; al secondo livello, focalizzato sui processi e sulla riduzione degli sprechi attraverso tecniche di miglioramento continuo, sono riconducibili i principi dal secondo all'ottavo; il terzo livello, che corrisponde a coltivare una gestione delle persone caratteristica di un leader Lean, attraverso il rispetto, la sfida e l'aiuto verso una crescita collaborativa, racchiude i principi dal nono all'undicesimo. Questi tre livelli portano dritti verso l'obiettivo finale, che si trova al quarto e ultimo livello, caratterizzato dalla risoluzione dei problemi, attraverso l'apprendimento e il miglioramento continuo, realizzabili solamente vedendo e toccando con mano di persona le situazioni da migliorare, ossia andando nel “genba”, che rappresenta il luogo dove le cose accadono. Nell'ultimo livello sono raggruppati i principi dal

¹⁸ *Ibidem*

dodicesimo al quattordicesimo. I tre livelli sopra la base della piramide, messi insieme, costituiscono gli elementi essenziali per dar luogo al miglioramento continuo detto “kaizen”.

Passando a descrivere il centro della casa del TPS, questo rappresenta il cuore dell’approccio Lean, costituito dal miglioramento continuo, che si ottiene mediante due tipi di tecniche: quelle che creano coinvolgimento delle persone e quelle che mirano a ridurre gli sprechi (Panizzolo, 2022)¹⁹.

Le tecniche focalizzate sulle persone mirano a fidelizzare, formare e coinvolgere tutti i membri di un team. A tale scopo, si basano sulla realizzazione di obiettivi comuni, sulla formazione “*cross-trained*” delle persone, impiegandole a rotazione su più lavori, in modo da velocizzare il processo di miglioramento e, infine, sui metodi di “*decision making*” detti “*Ringi*”, che consentano di prendere decisioni su più livelli gerarchici dell’organizzazione in ottica di aumento della trasparenza e collaborazione.

Per quanto riguarda la riduzione degli sprechi, si fa affidamento sul principio cardine del “*Genchi Genbutsu*”, che prevede di osservare con i propri occhi le problematiche in essere e analizzarne le cause attraverso tecniche di problem solving, in cui si definisce e analizza razionalmente un problema al fine di identificarne la causa e proporre una soluzione per risolverlo. Un metodo particolarmente efficace per analizzare la causa radice del problema è quello dei “5 Perché”, dove ci si pone un numero sufficiente di “Perché?” per sviluppare e approfondire le cause fino ad arrivare a fondo della causa originaria che lo ha generato.

Essendo il TPS un sistema flessibile e in continuo miglioramento, più recentemente Toyota ha modificato la parte centrale della casa per adeguarsi ai cambiamenti di un mercato sempre più globalizzato, sottolineando ancora di più l’importanza e la centralità delle persone. Come si può notare dalla Fig. 1.6, sono state aggiunte tre colonne centrali rappresentate dai fornitori, clienti e dipendenti.

¹⁹ *Ibidem*

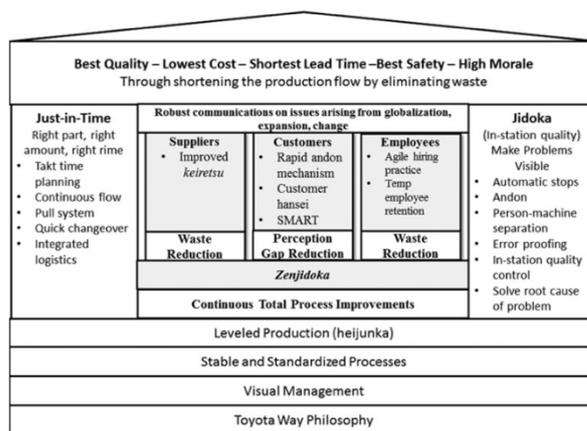


Fig. 1.6 Il modello del Toyota Production System ampliato con clienti, fornitori e dipendenti (Fonte: Kehr e Proctor, 2017)

In particolare, la riflessione sulle criticità legate all'utilizzo dei prodotti viene estesa ai clienti, al fine di capire la percezione che hanno questi verso il prodotto, identificare in modo tempestivo eventuali problemi di qualità e andare a ridurre il gap rispetto al prodotto offerto. A titolo di esempio si cita un metodo diretto come lo *Swift Market Analysis Response Teams*, in cui si cerca di entrare in contatto con il cliente entro 24 ore dopo un'eventuale segnalazione di anomalie per offrire un feedback rapido (Kehr e Proctor, 2017)²⁰. Una riflessione viene fatta anche nei confronti dei dipendenti, evitando il più possibile la scelta di fare assunzioni temporanee, mirando così a fidelizzare le persone affinché possano contribuire a diffondere e supportare la cultura all'interno dell'azienda.

Infine, viene introdotta una nuova modalità di controllo della qualità dei fornitori, detta "*Nuovo Keiretsu*", che si basa su relazioni in ottica *win-win* fondate sulla fiducia, la collaborazione e il mutuo supporto, cercando al contempo di contenere i costi e aumentare ulteriormente la qualità. Per raggiungere ciò, risulta efficace rendere i fornitori partecipi alla fase di sviluppo del prodotto e acquistare da diversi fornitori presenti nel mercato globale non più solamente singoli componenti ma sistemi integrati di componenti.

Queste ulteriori tre colonne, che costituiscono i cardini del miglioramento continuo, sono sorrette da una base in grado di rafforzare la struttura della casa: si parla di

²⁰ *Ibidem*

“*Zanjidoka*”, che significa “*Jidoka completo*”, ossia un ulteriore rafforzamento all’identificazione delle problematiche relative alla qualità del prodotto. Diversamente dal concetto di “*Jidoka*”, che ferma i propri confini di controllo all’interno della fabbrica, con “*Zanjidoka*” viene estesa la visibilità del processo oltre i confini della fabbrica, partendo dalla fase di concepimento del prodotto fino al fine vita, con il conseguente risultato di una migliore identificazione, anticipazione e previsione dei problemi relativi alla qualità (Kehr e Proctor, 2017)²¹. In sintesi, questi nuovi elementi inseriti nella parte centrale della casa del TPS, favorendo una comunicazione più rapida e robusta tra tutti gli attori della catena di approvvigionamento, garantiscono un tempestivo ed efficace rilevamento delle criticità, con conseguente miglioramento degli standard di qualità, sempre nell’ottica del principio cardine del miglioramento continuo.

Tutti gli elementi fin qui descritti non funzionano, ovvero non portano ai risultati potenzialmente raggiungibili, se applicati singolarmente. Essi contribuiscono ai risultati soltanto se uniti tutti insieme verso il raggiungimento degli obiettivi comuni: questo viene rappresentato dal tetto della casa del TPS. Le parti che compongono la struttura della casa lavorano in sinergia per ottenere prodotti che abbiano la miglior qualità possibile al minor costo, consegnandoli nel tempo più breve e valorizzando il lavoro delle persone, il tutto trainato dalla costante ricerca ed eliminazione degli sprechi, come motore principale del miglioramento continuo. Il TPS è stato oggetto di molti studi, in particolare grazie ai libri “*The Machine that Changed the World*” e successivamente “*Lean Thinking*” degli studiosi americani Womack e Jones, che hanno concettualizzato quella che oggi è conosciuta come Lean Production e più in generale la filosofia del Lean Thinking, su cui si basano i presupposti del sistema di gestione aziendale denominato Lean Management.

1.3 I principi del Lean Thinking

La filosofia del Lean Thinking concentra il proprio pensiero sulla ricerca ed eliminazione degli sprechi attraverso il contributo delle persone, al fine di generare

²¹ *Ibidem*

valore per il cliente, e si fonda su 5 principi fondamentali, enunciati di seguito e rappresentati nella Fig. 1.7 (Dilanthi, 2015)²²:

1. Definire il valore per il cliente
2. Identificare e mappare il flusso del valore
3. Far scorrere il flusso
4. Implementare un sistema di risposta al cliente di tipo “Pull”
5. Ricercare la perfezione

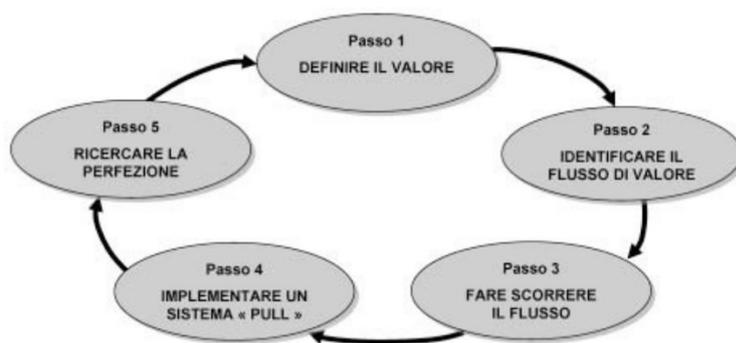


Fig. 1.7 I 5 principi del Lean Thinking (Fonte: Panizzolo, 2022)

Attraverso il primo principio si definisce il concetto di valore, ovvero tutto ciò per cui il cliente sarebbe disposto a pagare per ottenere il prodotto o servizio offerto dall'azienda.

Per definire cosa rappresenta valore, il secondo principio consiste nel mappare i flussi che portano alla creazione del valore. Il punto di partenza è rappresentato dal flusso operativo, ossia quell'insieme di attività dove le risorse in input vengono trasformate in output. Le attività impiegate all'interno del processo per produrre un prodotto o fornire un servizio possono essere suddivise in attività a valore per il cliente e attività non a valore; le attività non a valore sono ulteriormente scomponibili in attività direttamente eliminabili e attività riducibili ma non eliminabili al momento dell'analisi, per via di eventuali vincoli tecnologici. Le due tipologie identificate come attività non a valore aggiunto vengono definite sprechi, o utilizzando il termine giapponese “Muda”. Il secondo principio Lean richiede di

²² *Ibidem*

valorizzare solamente le attività a valore che risiedono nelle fasi di lavorazione del processo. Dopo l'analisi del flusso operativo, si passa al flusso informativo, ossia quell'insieme di attività dal ricevimento dell'ordine fino alla consegna del prodotto o servizio, che consentono lo scorrere del flusso operativo. Infine, si arriva a mappare il flusso di lavoro detto “*workflow*”, che racchiude le attività degli operatori e delle macchine e che consente lo scorrimento dei due flussi precedenti. Il terzo principio mira a far scorrere il flusso del valore lungo le varie fasi del processo in maniera efficiente e fluida, attraverso l'eliminazione degli sprechi precedentemente identificati. Per questo vengono identificate tre grandi categorie di sprechi (Dilanthi, 2015)²³:

- *Muda*: rappresenta lo spreco primario originato nel *workflow*;
- *Muri*: rappresenta il sovraccarico di macchine e operatori che consumano risorse senza però generare valore;
- *Mura*: rappresenta l'irregolarità data dalla variabilità del processo, come conseguenza della variabilità nella domanda di mercato o nelle risorse disponibili.

Particolarmente critica è l'instabilità generata dal “*Mura*”, ossia dalla variabilità del processo, poiché porta alla generazione di problematiche di qualità che causano a loro volta sovraccarichi e sprechi.

Più nello specifico i “*Muda*”, che rappresentano gli ostacoli allo scorrimento del flusso, si suddividono in 8 categorie (Womack e Jones, 1997)²⁴:

1. **Sovra-produzione**: produzione di una quantità maggiore di quella richiesta; è lo spreco più critico in quanto può generare a cascata tutti gli altri sprechi;
2. **Attese**: l'operatore attende per il passaggio da una fase della lavorazione a quella successiva, per mancanza di materiali o guasti;
3. **Trasporti**: spostamento dei materiali dal magazzino alla linea di produzione;

²³ *Ibidem*

²⁴ *Ibidem*

4. **Scorte:** accumuli di componenti, semilavorati e prodotti finiti non processati; queste in particolare rappresentano un costo e possono nascondere la presenza di problematiche non risolte;
5. **Movimentazioni:** movimenti eccessivi di operatori o macchinari non richiesti dal processo;
6. **Sovra-processi:** presenza di fasi del processo non richieste a causa di una errata progettazione;
7. **Difetti:** sforzo per identificare e correggere problemi di qualità che si creano nei componenti o prodotti che non seguono le specifiche;
8. **Intelligenza:** incapacità di sfruttare appieno le capacità delle persone attraverso il coinvolgimento e la valorizzazione del talento e della creatività.

Per l'eliminazione degli sprechi si adotta un approccio scientifico, rappresentato dal metodo PDCA (Plan, Do, Check, Act), introdotto dall'ingegnere americano Deming (Panizzolo, 2022)²⁵. Esso consiste in quattro fasi di analisi: una fase iniziale di PLAN, ossia di analisi e pianificazione delle attività volte all'eliminazione dello spreco e risoluzione del problema, seguita da una fase di DO, dove vengono eseguite le attività pianificate; a seguire, una fase di CHECK, con cui si controlla se i risultati rispecchiano le attese e, infine, una fase di ACT, fondamentale per standardizzare i risultati ottenuti certificandone il miglioramento. Il quarto principio, dopo aver eliminato gli sprechi e fatto scorrere il flusso del valore, è orientato all'implementazione di un sistema di risposta alla domanda del cliente di tipo "Pull". Questo sistema consiste in un'inversione della precedente logica "Push", incentrata sulla produzione per reparti e lotti di prodotto, nel tipo di produzione "Pull", che prevede una gestione per Value Stream di prodotto. In questo modo, è la domanda del cliente che "tira" la produzione dei prodotti e non sono più questi ultimi ad essere "spinti" verso i processi cliente senza che sussista un fabbisogno (Womack e Jones, 1997)²⁶. Ne consegue una sensibile riduzione del lead time di attraversamento del prodotto, favorendo una risposta più rapida alla domanda del cliente.

²⁵ *Ibidem*

²⁶ *Ibidem*

Il quinto ed ultimo principio del Lean Thinking promuove la ricerca della perfezione attraverso il miglioramento continuo e incrementale dei processi, detto anche “*kaizen*”. Una volta definito il valore per il cliente, identificato il flusso del valore e averlo fatto scorrere in modo fluido e continuo attraverso l’eliminazione degli sprechi e l’implementazione di un sistema “Pull” di risposta alla domanda, quello che viene a crearsi è un circolo virtuoso di ricerca del modo più efficiente di far scorrere il flusso. Nel tentativo di rispondere in maniera sempre più rapida alla domanda del cliente, si mettono continuamente alla luce nuove opportunità di miglioramento.

La realizzazione di ognuno di questi principi viene supportata dalla filosofia Lean, che rende disponibili tecniche e strumenti per un’efficace implementazione (Considi, 2023)²⁷. Per definire cos’è il valore per il cliente, si utilizzano tecniche come la VOC (*Voice of Customer*) e il modello di Kano, con le quali si indagano i bisogni primari da soddisfare e i requisiti fondamentali del prodotto o servizio. L’identificazione del flusso del valore avviene attraverso metodologie di Visual Management, che mappano i diversi flussi per andare ad identificare gli sprechi presenti, come il VSM (*Value Stream Mapping*), la PAM (*Process Activity Mapping*), la Swim Lane o la Spaghetti Chart. Una volta individuato il flusso del valore, per farlo scorrere in maniera continua, si applicano tecniche per l’eliminazione degli sprechi, come ad esempio 5S e SMED.

Per l’implementazione della produzione “Pull” si fa ricorso a sistemi Kanban e One-Piece Flow, che consentono di allineare la domanda di mercato con la produzione, facendo in modo che quest’ultima sia tirata dal cliente. Infine, la continua ricerca di nuovi spunti di miglioramento, al fine di tendere alla perfezione, ricorre ad approcci di management come i Cantieri Kaizen, i metodi Poka Yoke e le metodologie di analisi statistica quali Six Sigma.

Questi principi hanno carattere universale e vengono implementati in vari settori oltre alla produzione, come nella sanità, nella grande distribuzione, nella pubblica amministrazione, nella gestione degli uffici e, più in generale, nella gestione complessiva dell’azienda.

²⁷ *Ibidem*

1.4 Il Lean Management

Partendo dal paradigma giapponese di Toyota del TPS, che si è poi evoluto in Lean Thinking, attraverso gli studi americani di Womack e Jones, questo approccio viene poi declinato in maniera più generale nei confronti della gestione complessiva dell'azienda, prendendo il nome Lean Management. Quando si parla di Lean Management si intende proprio la gestione snella dell'azienda, basata sulla filosofia e sui principi del Lean Thinking, che tracciano la strada del miglioramento continuo dei processi aziendali, con l'obiettivo di incrementare la competitività e la produttività, contribuendo al coinvolgimento e alla crescita delle persone all'interno dell'organizzazione (Considi, 2023)²⁸. Il Lean non rappresenta più soltanto un insieme di strumenti e principi da seguire, bensì contribuisce alla creazione dei valori che caratterizzano la cultura dell'azienda.

L'estensione della teoria Lean alla gestione totale dell'azienda è un percorso che genera molta complessità, in quanto i principi e valori si applicano non solo alla produzione ma a tutte le aree aziendali che risultano tra loro interconnesse, quali l'amministrazione, la progettazione e lo sviluppo prodotto e la pianificazione. Il Lean Management, inoltre, introduce in azienda i temi della gestione e crescita delle persone e dell'importanza della leadership aziendale, in cui tutte le persone dal top management agli operatori devono essere coinvolti e allineati verso l'obiettivo comune del miglioramento continuo (Bertagnolli, 2022)²⁹.

L'adozione di questo approccio di gestione aziendale, in ultima analisi, permette di ottenere un duplice effetto: il costante impegno verso la riduzione degli sprechi, genera un aumento dell'engagement delle persone che, a sua volta, produce un aumento del valore percepito dal cliente e, di conseguenza, una crescita della redditività per l'azienda. L'implementazione del Lean Management all'interno dell'azienda richiede un approccio globale come mostrato in Fig. 1.8.

²⁸ Considi, www.considi.it/lean-management

²⁹ Bertagnolli F., 2022, *Lean Management Introduction and In-Depth Study of Japanese Management Philosophy*, Springer, Pforzheim.



Fig. 1.8 I 4 cicli di miglioramento per il successo dell'azienda (Fonte: Considi, 2023)

La figura rappresenta come per raggiungere il successo l'azienda necessita di concentrarsi in modo continuo su 4 principali tematiche di miglioramento (Considi, 2023)³⁰:

- porre in maniera continua l'attenzione su ciò che genera e non genera valore, il quale viene poi percepito dal cliente;
- coinvolgere e sensibilizzare sulle tematiche di gestione snella tutte le figure presenti in tutti i livelli organizzativi, in modo da far bene le cose (*Monozukuri*) e, allo stesso tempo, far crescere le persone (*Hitozukuri*);
- coinvolgere e allineare le persone attraverso l'individuazione in maniera continuativa degli sprechi presenti nei processi;
- tendere al miglioramento continuo attraverso l'adozione di nuovi standard, contribuendo così al successo dell'azienda.

Questo approccio al miglioramento continuo nella gestione di tutti i processi all'interno dell'azienda getta le basi e costruisce le premesse per nuove opportunità, legate all'implementazione efficace ed efficiente delle nuove tecnologie, sviluppate in tempi recenti e appartenenti alla nuova rivoluzione industriale, che va sotto il nome di Industria 4.0. Le nuove tecnologie e il collegamento tra Lean Management e Industria 4.0 sono oggetto di trattazione del prossimo capitolo.

³⁰ *Ibidem*

CAPITOLO 2

L'avvento di Industria 4.0

Nel presente capitolo si inizia trattando la storia delle quattro Rivoluzioni Industriali che portano alla nascita di Industria 4.0. Vengono poi descritti i nuovi paradigmi, le caratteristiche e i benefici di implementazione delle 9 Tecnologie Abilitanti. Infine, si discute dell'integrazione tra Industria 4.0 e modello organizzativo Lean, evidenziando possibili sinergie e modalità di integrazione tra tecnologie e strumenti Lean e concludendo con criticità e possibili nuove declinazioni.

2.1 Industria 4.0: cenni storici

Nel corso della storia il mondo dell'industria è passato attraverso varie fasi, come visto nel capitolo precedente, ognuna delle quali caratterizzata dall'emergere di nuove tecnologie dirompenti, in grado di modificare sia il modo di produrre che la vita quotidiana delle persone.

Si analizzano ora le 4 rivoluzioni industriali (Fig. 2.1) che, partendo dalla produzione manuale fino alla produzione automatizzata, hanno determinato la nascita di Industria 4.0 (Kumar e Kumar, 2020)³¹.

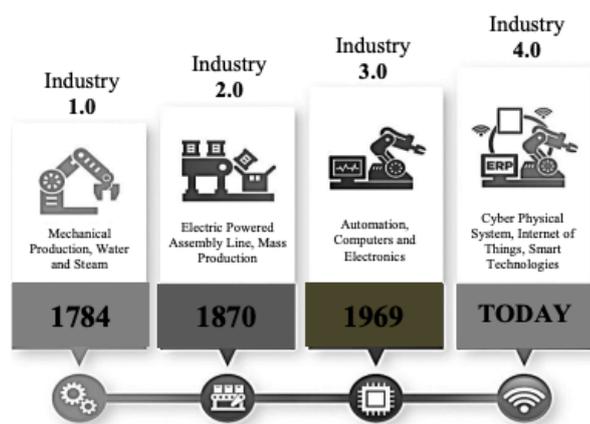


Fig. 2.1 Le rivoluzioni industriali (Fonte: Kumar e Kumar, 2020)

³¹ Kumar A., Kumar S., 2020, Industry 4.0: Evolution, Opportunities and Challenges, *International Journal of Research in Business Studies*, vol. 5, n.1, pp. 2455-2992.

La Prima Rivoluzione Industriale ha luogo in Gran Bretagna, nel 1784, e si caratterizza per due innovazioni fondamentali: in primo luogo, l'introduzione dei macchinari nei processi produttivi, in particolare della macchina a vapore, in sostituzione alla produzione artigianale; in secondo luogo, l'evoluzione dei sistemi di trasporto, nella fattispecie attraverso i treni a vapore, in grado di migliorare e velocizzare il trasporto dei prodotti. Queste determinano una nuova organizzazione delle fabbriche, dove si inizia a produrre in un periodo minore rispetto all'epoca artigianale e ad impiegare una maggiore forza lavoro. Durante la Prima Rivoluzione Industriale le fabbriche del tessile, del carbone e del ferro, che sfruttano le nuove macchine a vapore come fonte energetica, vedono un notevole sviluppo (Hassoun et al., 2022)³².

La Seconda Rivoluzione Industriale prende avvio nel 1870, attraverso la scoperta e l'applicazione in ambito industriale dell'energia elettrica e del motore a scoppio. Queste innovazioni consentono di sviluppare ulteriormente la produzione meccanicizzata, attraverso l'automazione delle linee di assemblaggio per la movimentazione dei materiali all'interno della fabbrica, e di migliorare il settore dei trasporti, consentendo una maggiore regolarità nell'approvvigionamento delle materie e la possibilità di commercializzare i prodotti in nuovi mercati più lontani. È proprio da qui che si origina quella che nel capitolo precedente è stata descritta come produzione di massa. Questo periodo, favorito oltremodo dallo scoppio delle guerre mondiali, segna un importante sviluppo nel settore siderurgico dell'industria pesante, specialmente nei paesi come Germania, Giappone e Stati Uniti.

La Terza Rivoluzione Industriale, detta anche "Rivoluzione Digitale", ha luogo a partire dal 1969, quando si assiste al passaggio dai sistemi analogici a quelli digitali, con la diffusione di microprocessori e computer. Sempre in questo periodo avviene la nascita di Internet, che origina un cambio di paradigma nelle tecnologie di comunicazione e informazione, rendendole più semplici, veloci e disponibili a tutti. Ne consegue che le industrie che traggono maggiori benefici da questa rivoluzione sono quelle elettroniche e informatiche.

³² Hassoun A. et al., 2022, The fourth industrial revolution in the food industry-Part I: Industry 4.0 technologies, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 63, n. 23, pp. 6547-656.

La prima volta in cui appare il termine “Industria 4.0” risale al 2011 in Germania, durante una conferenza a Hannover Messe, in cui viene presentato un progetto di sviluppo strategico dell’industria tedesca voluto dal governo per migliorare la propria competitività nel mercato globale. Il termine “Industria 4.0”, pertanto, racchiude l’essenza della Quarta Rivoluzione Industriale, definita come un cambio di paradigma, non caratterizzato dalla scoperta o invenzione di una singola tecnologia - come avvenuto nelle rivoluzioni precedenti - bensì di un insieme di tecnologie abilitanti come IoT e Big Data; queste consentono di aumentare in modo esponenziale l’automazione dei macchinari nella produzione industriale e, inoltre, a far sì che attraverso la connettività a banda larga e la digitalizzazione siano i prodotti a comunicare in tempo reale con i macchinari (Kumar e Kumar, 2020)³³. In quest’epoca viene a crearsi un sistema produttivo altamente automatizzato, dove le decisioni sono decentralizzate e i macchinari sono completamente autonomi. Infatti, l’uso massivo di sensori, a partire dalla raccolta e analisi dei dati fino alla presa di decisioni, va a creare quella che viene definita “fabbrica intelligente”: un sistema più flessibile dove, attraverso il miglioramento della comunicazione tra macchinari e prodotti, si ottiene un adattamento alla domanda sempre più personalizzata, con un conseguente aumento di produttività.

2.2 Le caratteristiche principali di Industria 4.0

Il nuovo modello introdotto con lo sviluppo di Industria 4.0 porta a un radicale cambiamento nel mondo produttivo, impattando l’intera catena del valore e dando accesso a nuovi modelli di business, con un conseguente aumento e miglioramento della produttività. Questo è determinato dalle mutate condizioni al contorno riguardanti gli aspetti economici, sociali e politici, che richiedono alle industrie di adattarsi per rimanere competitive. Aumenta in modo esponenziale il grado di automazione digitale, dove assumono un ruolo centrale la raccolta e l’elaborazione dei dati, permettendo la realizzazione di processi veloci grazie alla disponibilità diffusa e in tempo reale di informazioni. Si assiste in ambito produttivo alla nascita di sistemi intelligenti in grado di integrare la parte fisica con quella digitale, in modo

³³ *Ibidem*

che i prodotti e le macchine possano interagire in autonomia nella presa di decisioni. Un esempio si può osservare nell'ambito della manutenzione predittiva dove la registrazione dei parametri di usura di un componente meccanico viene rilevata digitalmente in tempo reale, permettendo alla macchina di prendere decisioni di modifica degli stessi (Kemper et al., 2014)³⁴.

Il fenomeno Industria 4.0 si caratterizza, in sostanza, da 3 principali paradigmi (Pereira e Romero, 2017)³⁵: *Smart Product*, *Smart Machine* e *Augmented Operator*. Si descrivono in seguito le principali caratteristiche.

- *Smart Product* o Prodotto Intelligente: si intendono tutte quelle tipologie di prodotti che, grazie alla connettività e all'uso di sensori integrati e microchip, riescono ad immagazzinare ed elaborare un'elevata mole di dati; attraverso questi dati, riescono a comunicare e interagire in modo attivo con l'ambiente e il sistema produttivo. Un aspetto molto importante, che segna un cambiamento radicale rispetto al passato nel concetto di prodotto, risiede nel fatto che i prodotti intelligenti assumono un ruolo attivo nel processo poiché, riuscendo a dare feedback lungo tutto il ciclo di vita, consentono al sistema produttivo la raccolta di importanti informazioni da usare in fase di progettazione per una modifica e un adeguamento dei parametri.
- *Smart Machine* o Macchina Intelligente: ne fanno parte tutti i macchinari connessi in rete ed equipaggiati di sensori che abilitano una connessione tra la parte fisica e quella digitale, individuando in modo autonomo eventuali problematiche e, allo stesso tempo, assumendo decisioni per risolverle. Inoltre, questi riescono a comunicare in tempo reale con altri dispositivi, moduli di produzione e prodotti che sono interconnessi, permettendo un'organizzazione decentralizzata della produzione e aumentando il livello di automazione della fabbrica. Attraverso le macchine intelligenti, in grado di automatizzare il processo sia produttivo che decisionale, la fabbrica diventa intelligente, flessibile e dinamica nella risposta alle esigenze del cliente.

³⁴ Kemper H., Fettke P., Feld T., Hoffmann M., 2014, Industry 4.0, *Business & Information Systems Engineering*, vol.4, pp. 239-242.

³⁵ Pereira A.C., Romero F., 2017, A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept, *Manufacturing Engineering Society International Conference*, Vigo, Spagna.

- *Augmented Operator* o Operatore Aumentato: rappresenta l'evoluzione della figura dell'operatore nell'ambiente di lavoro dell'Industria 4.0 che, grazie alle nuove tecnologie come visori ottici o dispositivi indossabili, si trova ad interfacciarsi in modo collaborativo con i macchinari, garantendo una coesistenza del rapporto uomo-robot. L'operatore aumentato assume un ruolo più strategico che operativo nel processo produttivo, costituendo una risorsa flessibile all'interno di un'ambiente sempre più complesso.

Dal momento in cui i paradigmi dell'Industria 4.0 appena descritti vengono implementati a livello aziendale, si giunge alla realizzazione del modello delle Fabbriche Intelligenti o *Smart Factory*; si tratta di fabbriche completamente automatizzate, che si basano sull'applicazione di sensori per l'acquisizione dei dati provenienti dai processi produttivi e utilizzano le nuove tecnologie per creare sistemi produttivi sempre più autonomi.

La diffusione delle nuove tecnologie porta ad un adattamento veloce e flessibile nelle modalità di risposta al mercato da parte delle aziende. Per fare fronte a una domanda sempre più personalizzata e per la quale il fattore competitivo diventa il tempo di consegna, la loro implementazione offre maggiore flessibilità nello sviluppo del prodotto, garantendo così il grado di personalizzazione richiesto e riducendo i tempi di sviluppo. Inoltre, la crescente esigenza di rapidità nel “*time to market*” è resa possibile spostando le decisioni ad un livello più decentralizzato, con una conseguente semplificazione dell'organizzazione gerarchica aziendale (Kemper et al., 2014)³⁶.

Un ulteriore aspetto legato alla forte affermazione delle nuove tecnologie consiste nell'aumento della meccanicizzazione e del livello di automazione dei sistemi produttivi, con la nascita di soluzioni flessibili e automatiche, come ad esempio le celle di produzione autonome, nelle quali risulta possibile ottimizzare e modificare in modo indipendente le varie fasi produttive. In aggiunta, la sempre maggiore miniaturizzazione dei componenti elettronici risulta di notevole supporto al processo di digitalizzazione, consentendo l'acquisizione in maniera massiva di dati e il collegamento in rete dei vari componenti del processo produttivo.

³⁶ *Ibidem*

Parallelamente a tutto ciò, l'avvento dei paradigmi di Industria 4.0 lascia spazio a un'ulteriore considerazione legata al fatto che le nuove tecnologie, che assumono un ruolo dominante e centrale, necessitano di convivere con la figura umana. La trasformazione digitale, infatti, porta con sé una trasformazione dell'ambiente di lavoro spostando l'attenzione sull'importanza della figura del lavoratore che, a fronte di una maggiore automazione delle attività, necessita di competenze adeguate allo svolgimento di nuove mansioni (Pereira e Romero, 2017)³⁷. Le nuove opportunità offerte dalle tecnologie digitali non solo impattano sul mercato del lavoro, creando nuovi ruoli professionali, ma consentono anche alle aziende di ottimizzare l'utilizzo delle risorse. In parallelo al tema della produttività, risulta necessario valutare anche il ruolo delle tecnologie per quanto riguarda la sostenibilità sociale e ambientale dell'impresa, che riveste un ruolo di crescente importanza. Tuttavia, prima di entrarvi in dettaglio, nella restante parte del capitolo sono discusse le caratteristiche e possibili applicazioni delle tecnologie digitali di Industria 4.0 e il loro legame con l'approccio Lean.

2.3 Le 9 Tecnologie Abilitanti

I nuovi paradigmi di Industria 4.0, che ruotano attorno ad un elevato grado di automazione garantito dalla connettività, integrazione e digitalizzazione dei processi, possono essere implementati a livello produttivo attraverso l'adozione delle 9 Tecnologie Abilitanti riportate in figura 2.2: IoT (*Internet of Things*), Big Data and Analytics, Cybersecurity, Cloud, Integrazione verticale e orizzontale, Simulation, AM (*Additive Manufacturing*), AR (*Augmented Reality*) e, infine, Robots (Bahrin et al, 2016)³⁸.

L'integrazione di queste tecnologie digitali con il mondo fisico della produzione è resa possibile dall'utilizzo di una infrastruttura di rete universale detta CPS (*Cyber-Physical System*), che costituisce il principale driver tecnologico per lo sviluppo delle Tecnologie Abilitanti.

³⁷ *Ibidem*

³⁸ Bahrin M.A.K., Othman M.F., Azli N.H.N., Talib M.F., 2016, Industry 4.0: A review on Industrial Automation and Robotic, *Jurnal Teknologi*, vol.78, n 13, pp. 137-143.

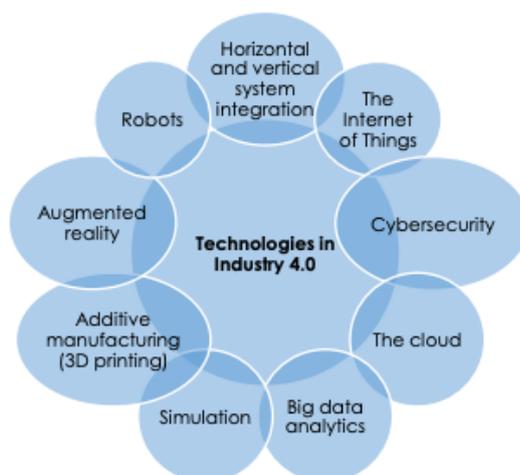


Fig. 2.2 Le 9 Tecnologie Abilitanti di Industria 4.0 (Fonte: Bahrin et al, 2016)

Il CPS viene definito come il sistema che permette di associare gli ambienti fisici alla loro rappresentazione digitale, mediante una gestione integrata e interconnessa. Questa forte interconnessione e integrazione tra sistemi fisici e digitali consente l'accesso a dati e informazioni in tempo reale, con un maggior grado di controllo e coordinamento e una conseguente ottimizzazione nella gestione dei processi. A livello produttivo il CPS viene declinato in CPPS (*Cyber-Physical Production System*), ovvero il sistema che garantisce l'integrazione tra i macchinari produttivi e la fabbrica, dando luogo all'integrazione sia orizzontale che verticale dei sistemi produttivi con l'intera catena di approvvigionamento, consentendo così una produzione intelligente (Pereira e Romero, 2017)³⁹.

A seguire, vengono passate in rassegna le caratteristiche principali delle 9 tecnologie che, attraverso il CPPS, abilitano i paradigmi dell'Industria 4.0 (Bahrin et al, 2016)⁴⁰.

- **IoT (Internet of Things):** costituisce l'infrastruttura di rete dove gli oggetti fisici comunicano e trasmettono dati e informazioni alla parte digitale, tramite la connessione in Internet e l'uso di sensori e attuatori, diventando così parte attiva nel processo produttivo; questi dati sono poi visualizzabili su monitor o dispositivi indossabili in modo da facilitarne il monitoraggio

³⁹ Ibidem

⁴⁰ Ibidem

durante le operazioni. Nell'ambito produttivo, l'IoT viene definito IIoT (*Industrial Internet of Things*), ovvero l'infrastruttura che permette di raccogliere in tempo reale i dati provenienti dai macchinari connessi in rete. Con IIoT si integra una tecnologia che prende il nome di RFID (*Radio Frequency Identification*), con la quale risulta possibile tracciare e raccogliere informazioni dai prodotti, attraverso dei codici a barre che li identificano univocamente; questo abilita la condivisione tra tutti gli attori della catena di approvvigionamento, con un rafforzamento della tracciabilità e trasparenza del dato. In sostanza, questa tecnologia permette di prendere decisioni decentralizzate in tempo reale su dati costantemente aggiornati, andando ad aumentare la produttività degli impianti (Erboz, 2017)⁴¹.

- **Big Data and Analytics:** rappresentano la grande mole di dati, grezzi e complessi, raccolta attraverso l'IoT e che necessita di passare successivamente alla fase di elaborazione. La fase di Analytics consiste nel prendere ed elaborare attraverso algoritmi grandi set di dati grezzi, per trasformarli in informazioni utilmente spendibili ai fini decisionali. Questa fase rappresenta il vero valore aggiunto della tecnologia Big Data and Analytics, in quanto le informazioni raccolte ed elaborate in tempo reale permettono all'azienda di prendere decisioni rapide, con un maggiore ritorno economico. Alcune delle applicazioni concrete si trovano nella manutenzione predittiva, dove gli algoritmi predittivi rendono possibile anticipare eventuali guasti; oppure nelle analisi di mercato, dove viene agevolata la comprensione delle tendenze e preferenze dei clienti. Risulta pertanto evidente come la gestione dei dati nell'ambito di Industria 4.0 costituisce un nuovo elemento in grado di creare vantaggio competitivo per le aziende.
- **Cybersecurity:** la grande disponibilità di dati diffusa dall'applicazione delle tecnologie di Industria 4.0 porta alla luce il tema relativo alla gestione della sicurezza dei dati, poiché essi costituiscono un asset strategico per le aziende. La Cybersecurity rappresenta quell'insieme di sistemi di difesa atti

⁴¹ Erboz G., 2017, How to Define Industry 4.0: The Main Pillars Of Industry 4.0, *Managerial Trends in the development of enterprises in Globalization Era*, pp. 761-767.

a prevenire un eventuale attacco hacker o una fuga di dati, garantendone la riservatezza e l'integrità. La verifica delle identità e degli accessi di macchine e utenti assume, quindi, un ruolo fondamentale al fine di garantire una trasmissione delle informazioni sicura (Bahrin et al, 2016)⁴². Tra i sistemi di Cybersecurity, particolare importanza assume il sistema della Blockchain, che consiste in un registro crittografato condiviso, nel quale le informazioni vengono scambiate in una serie di blocchi di dati successivi in maniera irreversibile; ogni passaggio viene rilevato e tracciato così che tutti gli accessi e i passaggi di informazioni avvengano in sicurezza e trasparenza.

- **Cloud:** è un sistema di archiviazione da remoto connesso in rete, basato sulla struttura client/server, in cui è possibile archiviare una grande mole di dati e accedervi in qualsiasi momento e luogo attraverso una connessione Internet. Oltre a mettere a disposizione uno spazio di archiviazione, il Cloud fornisce risorse di calcolo a cui è possibile accedere momentaneamente e che sono a disposizione di più utenti (Kumar e Kumar, 2020)⁴³. Esistono tre tipologie di servizi Cloud che lo rendono flessibile e modulare a seconda delle esigenze: SaaS (*Software as a Service*) in cui il cliente acquista l'accesso da remoto tramite licenza ad uno specifico software disponibile in rete; PaaS (*Platform as a Service*) in cui al cliente viene concesso l'accesso a pagamento, alla piattaforma di sviluppo del costruttore, per poter sviluppare il proprio software; IaaS (*Infrastructure as a Service*) che mette a disposizione spazi di archiviazione aggiuntiva come servizi esterni a pagamento (Bahrin et al, 2016)⁴⁴. Tra i sistemi Cloud più diffusi si possono considerare Google Drive, iCloud e Windows Azure. Risulta evidente come questo tipo di tecnologia sia in grado di facilitare gli scambi e abbattere in modo significativo i costi per l'accesso alle informazioni.
- **Integrazione verticale e orizzontale:** l'uso delle precedenti tecnologie, in particolare la raccolta e l'analisi dei dati derivanti dalle prestazioni del sistema produttivo, rende disponibili le informazioni a tutte le aree interne

⁴² *Ibidem*

⁴³ *Ibidem*

⁴⁴ *Ibidem*

della fabbrica e a tutti gli attori della catena di approvvigionamento. Nel primo caso, si parla di integrazione verticale, grazie alla quale le informazioni vengono condivise in modo trasparente integrando tutte le aree aziendali. Nel secondo caso, l'integrazione si dice orizzontale in quanto tutte le informazioni disponibili nel Cloud sono rese accessibili agli altri membri e partner della catena di fornitura. Ogni membro della catena del valore che sia integrato verticalmente, attraverso la rete industriale basata sul Cloud, può integrarsi orizzontalmente con gli altri membri, dando origine a una struttura auto-organizzata e integrata, dove il flusso delle informazioni è automatizzato ed efficiente. I vantaggi diretti di queste implementazioni sono legati al risparmio generale dei tempi nel processo produttivo, con la conseguente riduzione dei costi per la realizzazione del prodotto e, quindi, l'aumento del valore per il cliente (Bahrin et al., 2016)⁴⁵.

- **Simulation:** detta anche Simulazione, costituisce un elemento innovativo molto importante a livello della produzione industriale sia in termini di efficienza che di sostenibilità. Infatti, attraverso l'uso di un modello di simulazione digitale del processo di produzione, che viene addestrato con i dati provenienti in tempo reale dal processo fisico, risulta possibile modificare e testare i vari parametri prima di passare alla produzione fisica del prodotto finale. La simulazione del risultato finale porta con sé un primo vantaggio legato alla possibile messa in atto di azioni correttive nei parametri, che comporta la riduzione dei costi dovuti a eventuali problemi di qualità nella fase successiva di realizzazione del prodotto. In secondo luogo, attraverso l'ottimizzazione dei processi e delle operazioni l'azienda è in grado di attuare una pianificazione strategica più accurata. Ne risulta, così, una migliore qualità finale del prodotto e allo stesso tempo una riduzione dei tempi di produzione.
- **Additive Manufacturing:** detta anche “produzione additiva” o “stampa 3D”, si differenzia dalla più tradizionale produzione per asportazione di truciolo, in quanto consiste nel produrre un oggetto partendo da un modello digitale, realizzandolo tramite la sovrapposizione di strati di materiale o

⁴⁵ *Ibidem*

polveri consecutivi. Questo consente di ottenere una produzione a piccoli lotti, riducendo drasticamente le scorte di materiale. Si tratta, infatti, di una tecnologia particolarmente utilizzata nella produzione di prototipi in fase di sviluppo, divenuti fondamentali nell'era della *mass customization*⁴⁶, che richiede prodotti con caratteristiche altamente personalizzate e con geometrie complesse, non realizzabili con i metodi di produzione tradizionali. Basandosi su modelli digitali, inoltre, abilita la decentralizzazione dei sistemi produttivi, in quanto un prodotto può essere realizzato in un sistema produttivo diverso da quello in cui viene concepito. Quest'ultimo aspetto si traduce in una riduzione dei costi di trasporto, dei tempi di consegna, dei volumi produttivi e delle scorte a magazzino (Kumar e Kumar, 2020)⁴⁷.

- **Augmented Reality:** detta anche Realtà Aumentata (AR), è una tecnologia interattiva che, dalla combinazione del mondo fisico con il mondo digitale, rende disponibili informazioni aumentate in modo visivo e in tempo reale. Queste vengono visualizzate su dispositivi elettronici come tablet o visori ottici oppure proiettate attraverso ologrammi nella postazione di lavoro. In ambito produttivo, la Realtà Aumentata va a modificare la relazione uomo-macchina, dove quest'ultima assiste l'operatore nelle attività di manutenzione o ispezione. I vantaggi sono legati principalmente alla semplificazione del lavoro svolto, con una maggiore facilità nella presa di decisioni e flessibilità della figura dell'operatore nello svolgimento delle attività all'interno dei processi (Bahrin et al., 2016)⁴⁸.
- **Robots:** detti anche “Robot Autonomi”, trovano largo impiego in diverse aree delle aziende, in particolare nella produzione e nella logistica, per lo svolgimento di attività che risultano complesse, ripetitive o fisicamente usuranti per l'uomo. I Robot Autonomi possono lavorare, appunto, in autonomia sebbene risulti molto più efficace la collaborazione robot-uomo.

⁴⁶ *Mass customization*: approccio produttivo che si fonda sulla produzione di massa, ma con prodotti personalizzati sulla base delle specifiche esigenze dei clienti; mantiene i bassi costi legati alle economie di scala, e quindi prezzi ragionevoli, pur soddisfacendo le diverse specifiche richieste dai clienti.

⁴⁷ *Ibidem*

⁴⁸ *Ibidem*

Infatti, grazie all'utilizzo di interfacce grafiche, l'operatore che controlla il processo è in grado di fornire informazioni e istruzioni al robot che esegue le attività; in alternativa il robot può eseguire in autonomia un *task* in tempo mascherato, mentre l'operatore ne sta eseguendo un altro diverso. L'impiego dei robot sta crescendo con l'evoluzione delle altre tecnologie introdotte da Industria 4.0, considerando che l'IIoT ed il collegamento in Cloud abilitano la loro gestione anche da remoto. Inoltre, i sensori li guidano nell'apprendimento dei movimenti eseguiti dagli operatori, ottimizzandoli al fine di eseguire le attività del processo con maggior precisione.

In sintesi, l'adozione delle tecnologie di Industria 4.0 rappresenta una fonte rilevante di vantaggio competitivo per l'azienda che le adotta rispetto ai concorrenti. L'innovazione tecnologica punta a rendere la produzione più efficiente e intelligente, favorendo un alto grado di automazione dei processi che conferisce flessibilità nella produzione e capacità di rispondere in modo personalizzato alle richieste dei clienti.

Rispetto a quanto emerge dall'analisi delle tecnologie, infatti, risulta evidente come l'integrazione del mondo fisico con il mondo digitale, attraverso la raccolta dei dati e in particolare la loro elaborazione, assuma un ruolo centrale nello sviluppo dell'automazione industriale (Considi, 2023)⁴⁹. Inoltre, l'instaurarsi di un rapporto collaborativo dell'uomo con le macchine, tramite dispositivi elettronici e nuove interfacce digitali, migliora sensibilmente le condizioni lavorative.

2.4 Il legame tra Industria 4.0 e Lean Management

La rapida ascesa del nuovo paradigma di Industria 4.0 e con esso la nascita delle nuove tecnologie abilitanti, porta le imprese a interrogarsi sull'adozione di un nuovo percorso di cambiamento, da un punto di vista sia culturale che organizzativo. Infatti, il percorso di innovazione di Industria 4.0 si pone in parallelo al modello organizzativo del Lean Management, visto nel capitolo precedente e già da tempo implementato nelle aziende. Ad una prima analisi, i due paradigmi possono sembrare in contrasto, in quanto il Lean Management è stato

⁴⁹ Considi, 2023, www.considi.it/industria-4-0

originariamente concepito, in modo indipendente da tecnologie di automazione complesse, come quelle che caratterizzano Industria 4.0. Nonostante ciò, Lean e digitalizzazione hanno anche molti punti in comune, ponendosi entrambi come obiettivo principale l'aumento dell'efficienza e della flessibilità produttiva. Proprio per questo motivo, molte aziende in tempi recenti hanno accolto la sfida di implementare contestualmente i due modelli per beneficiare delle possibili sinergie (Walentynowicz e Pienkowski, 2021)⁵⁰.

In tempi recenti è cresciuto in modo rilevante l'interesse e l'attenzione verso il tema riguardante la relazione tra i due paradigmi. A partire dal 2015 e nel giro di tre anni, è più che decuplicato il numero di pubblicazioni scientifiche in cui i ricercatori hanno analizzato e approfondito il legame che è venuto a crearsi tra Industria 4.0 e Lean Management, come emerge in Fig. 2.3. Da questi studi, l'unione dei principi Lean con le nuove tecnologie digitali porta alla diffusione dei termini di Lean Automation o Lean 4.0.

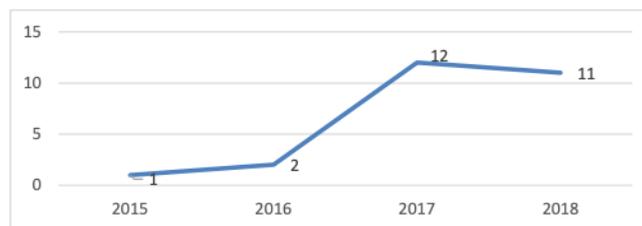


Fig. 2.3 Pubblicazioni scientifiche dal 2015 sul legame Industria 4.0 e Lean Management
(Fonte: Walentynowicz e Pienkowski, 2021)

Da un lato, il Lean Management porta a una diminuzione dei costi in conseguenza alla riduzione degli sprechi, ponendosi come obiettivi il miglioramento della qualità dei prodotti e servizi, la maggior velocità dei tempi di consegna e l'aumento della produttività; dall'altra parte, Industria 4.0 mira ad aumentare il grado di automazione delle imprese, attraverso l'adozione di nuove tecnologie di produzione, perseguendo le stesse finalità di aumento dell'efficienza sia dei processi interni che esterni alla fabbrica e innalzamento della produttività e della competitività aziendale. È evidente che esistono diversi punti in comune tra i due

⁵⁰ Walentynowicz P., Pienkowski M., 2021, Application of Industry 4.0 Technologies to Support Lean Companies, *International Business Information Management Association*, pp. 17414-17423.

paradigmi, che li mettono in relazione l'uno con l'altro, tra questi l'orientamento ai processi e l'analisi dei dati come elementi centrali delle pratiche di miglioramento al fine di ottenere un aumento della produttività.

Come emerge dagli studi di Naciri et al. (2022)⁵¹, il rapporto tra Lean Management e Industria 4.0 è duplice: il paradigma Lean costituisce un prerequisito per l'implementazione delle tecnologie di Industria 4.0 e, dall'altro punto di vista, le tecnologie di Industria 4.0 ottimizzano e facilitano l'applicazione delle tecniche Lean. Il primo passo deve essere rappresentato, dall'applicazione delle metodologie Lean, attraverso le quali l'impresa ottiene piena consapevolezza dei processi, rendendoli efficienti, robusti e snelli. Così facendo, la riduzione degli sprechi evita di incorrere nella loro digitalizzazione e si crea la base per ottenere un'automazione efficiente attraverso l'implementazione delle nuove tecnologie digitali. Il secondo passo, dunque, consiste nell'implementazione del paradigma di Industria 4.0, all'interno di un'organizzazione che già opera attraverso il modello Lean, favorendo innanzitutto la disponibilità di informazioni in tempo reale. Questa va a rafforzare l'applicazione delle tecniche Lean, rendendole più flessibili all'interno di processi complessi e per i quali il miglioramento risulta particolarmente sfidante. L'applicazione delle tecnologie digitali ha un effetto positivo se applicato in sinergia alle tecniche Lean. In particolare, attraverso la comunicazione istantanea tra macchine e oggetti, va a potenziare le logiche alla base del modello Lean, ovvero Just-in-Time e Jidoka. Si vanno ora a trattare alcuni esempi e considerazioni sugli impatti delle nuove tecnologie abilitanti di Industria 4.0 sui principi cardine e sugli strumenti principali del paradigma Lean (Walentynowicz e Pienkowski, 2021)⁵².

- **IIoT** (*Industrial Internet of Things*): attraverso la raccolta dati in tempo reale dai sensori integrati sia nelle macchine che nei prodotti, consente un controllo puntuale sull'intero processo produttivo con il monitoraggio dei KPI, fornendo un supporto alle tecniche di Value Stream Mapping. Inoltre, migliora le pratiche di manutenzione, con l'individuazione rapida delle cause di fermata e consente di comunicare tempestivamente un messaggio

⁵¹ Naciri L., Mouhib Z., Gallab M., Nali M., Abbou R., Kebe A., 2022, Lean and Industry 4.0: A leading harmony, 3rd *International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing*, Rabat, Marocco.

⁵² *Ibidem*

di errore all'operatore, su dispositivi come tablet o smartwatch, potenziando così la tecnica Andon. In aggiunta, integrata con la tecnologia RFID, consente una tracciabilità completa dei prodotti dentro e fuori il processo produttivo, individuando e reagendo rapidamente all'insorgere di difetti di qualità. Infine, attraverso algoritmi di Machine Learning che danno origine a un'automazione intelligente tra i macchinari, abilita la comunicazione tra i macchinari stessi, rendendoli in grado di reagire in modo autonomo alla presenza di anomalie, il tutto in linea con il principio Jidoka.

- **Big Data and Analytics:** attraverso la raccolta di una grande mole di dati e l'analisi degli stessi, permette di fornire informazioni chiare, compatte e prive di sovra-informazioni. In questo modo favorisce il processo decisionale, basandolo su dati certi e in tempo reale, al fine di identificare la causa radice delle problematiche e creare un maggiore livello di qualità interno ai processi, ancora una volta riconducibile al principio cardine dello Jidoka (Walentynowicz e Pienkowski, 2021)⁵³.
- **Cloud:** grazie all'integrazione con l'IIoT, consente l'accesso alle informazioni sempre aggiornate in tempo reale da parte degli operatori che agiscono sul processo, fornendo così i dati giusti, nel posto giusto e al momento giusto. Attraverso questa tecnologia, inoltre, si favorisce la decentralizzazione del processo decisionale e la collaborazione tra gli operatori, che hanno la possibilità di accedere in qualsiasi momento all'informazione.
- **Cybersecurity:** tra tutte le tecnologie digitali, questa risulta imprescindibile nelle imprese che adottano i paradigmi di Industria 4.0, indipendentemente dall'applicazione di modelli di gestione quali il Lean Management, in quanto la sicurezza dei dati diventa un prerequisito.
- **Integrazione verticale e orizzontale:** la prima abilita un flusso di informazioni continuo ed efficiente all'interno dell'azienda, potenziando le logiche Andon di rilevamento e risoluzione dei problemi; la seconda consente uno scambio di informazioni rapido e accurato tra tutti i membri

⁵³ *Ibidem*

della catena di approvvigionamento, dai fornitori ai clienti, rafforzando le logiche di consegna Just-in-Time.

- **Simulation:** all'interno del contesto Lean, l'applicazione della simulazione ha molteplici vantaggi. In prima battuta, permette di potenziare la formazione del personale, tramite la simulazione in un ambiente virtuale dei possibili scenari futuri di interruzioni della produzione, per testare le capacità decisionali dei manager. In aggiunta, in fase di dimensionamento dei Kanban, consente di testare i vari parametri, ottenendo una progettazione più veloce e a minor costo (Walentynowicz e Pienkowski, 2021)⁵⁴.
- **Additive Manufacturing (AM):** si adatta particolarmente bene alla prototipazione snella, in quanto sostiene la realizzazione rapida ed economica di un prototipo, consentendo già in fase grezza di sviluppo del prodotto di effettuare test per prevenire possibili difetti di qualità. Inoltre, in ottica Just-in-Time, dà la possibilità di realizzare pezzi di ricambio sul luogo, con una conseguente riduzione delle scorte e dei costi di stoccaggio. Infine, può venire in aiuto nell'implementazione della metodologia 5S, per la realizzazione di supporti visivi o *shadow-board*⁵⁵, potenziando le logiche Poka-Yoke legate alla prevenzione degli errori.
- **Augmented Reality (AR):** si integra in maniera efficace nel paradigma Lean trovando applicazioni in diversi contesti. Contribuisce a velocizzare la formazione *cross-training* dei nuovi operatori, fornendo informazioni in tempo reale durante l'esecuzione delle operazioni, attraverso ologrammi proiettati sulla postazione di lavoro che guidano alla corretta esecuzione. Mediante la generazione di immagini con interfacce grafiche, che potenziano la realtà fisica con informazioni digitali, l'AR si abbina ancora una volta alle logiche Poka-Yoke, accompagnando e facilitando le attività dell'operatore, aumentando il livello di standardizzazione e, di conseguenza, rendendo difficile e improbabile la generazione dell'errore.

⁵⁴ *Ibidem*

⁵⁵ *Shadow-board*: metodo per organizzare e tenere in ordine oggetti, utensili e strumenti di lavoro, mediante la realizzazione di una sagoma spugnosa.

- **Robots:** quest'ultima tecnologia trova ampio impiego all'interno delle organizzazioni Lean, in particolare in ambito logistico e produttivo. Sul piano logistico, trova impiego soprattutto attraverso i veicoli a guida autonoma da trasporto, detti AGV, che attraverso l'integrazione della tecnologia IIoT possono muoversi su percorsi stabiliti, all'ora definita e per raggiungere destinazioni prestabilite (Walentynowicz e Pienkowski, 2021)⁵⁶. Questa combinazione viene utilizzata nel percorso di rifornimento dei supermarket, noto con il termine *Milk-Run*, rendendolo più efficiente e avendo sempre una panoramica della movimentazione dei prodotti e, inoltre, garantisce il rispetto delle logiche Just-in-Time. Nei reparti produttivi, specialmente nelle linee di assemblaggio, trova applicazione con Cobot, ovvero Robot Collaborativi, che lavorano in sinergia con l'operatore, assegnando loro attività ripetitive o pericolose per l'uomo. Quest'ultimo aspetto è in linea con il principio di separazione uomo-macchina, poiché aumenta l'automazione delle linee e garantisce maggiore ergonomia e sicurezza nei confronti dell'operatore.

L'esistenza e l'intensità del legame che coinvolge in modo sinergico i due paradigmi emerge anche dallo studio sviluppato da Tortorella et al. (2021)⁵⁷, che analizza un campione di 147 aziende manifatturiere di medie e grandi dimensioni, provenienti per il 51% dal settore metalmeccanico, in cui le pratiche Lean sono ben consolidate e applicate da oltre due anni. In questa ricerca viene utilizzato come metodo di indagine un questionario diviso in tre parti, somministrato a figure quadre dell'azienda, così articolato: nella prima parte viene chiesto loro se hanno conoscenza di legami attuali in azienda tra tecniche Lean e tecnologie digitali, citandone un esempio; nella seconda parte viene verificato il livello di applicazione di 41 pratiche Lean, attraverso l'uso di una scala Likert da 1 (non applicata) a 5 (pienamente applicata); infine, nell'ultima parte del questionario, viene chiesto loro il livello di adozione di 10 tecnologie di automazione digitale, usando la medesima scala Likert. Dai dati raccolti emergono 410 relazioni a coppie, di cui è stata

⁵⁶ *Ibidem*

⁵⁷ Tortorella G., Sawhney R., Jurburg D., Carisio de Paula I., Tlapa D., Thurer M., 2021, Towards the proposition of a Lean Automation framework Integrating Industry 4.0 into Lean Production, *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 32, n. 3, pp. 593-620.

esaminata la correlazione parziale; si considerano poi solo le correlazioni parziali significative delle coppie che hanno riportato un p-value > 0,05 e con un legame moderato avente un coefficiente di correlazione parziale $r \geq 0,3$. I risultati dell'indagine sono riassunti attraverso il modello rappresentato in Fig. 2.4.

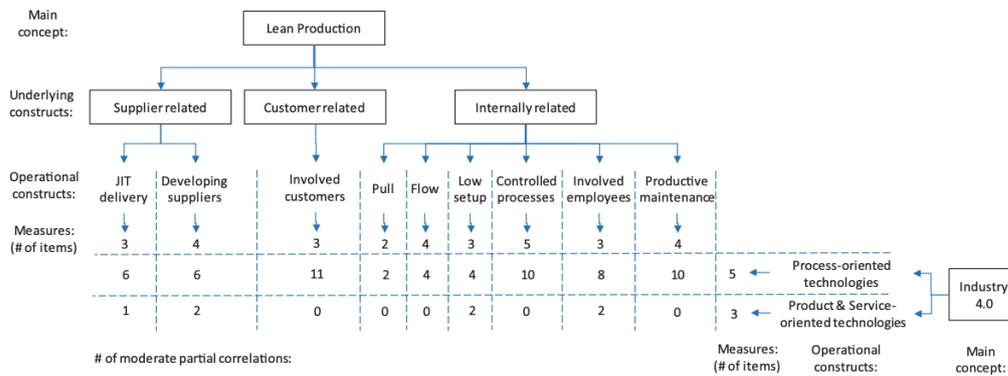


Fig. 2.4 Correlazioni parziali significative tra pratiche Lean e Industria 4.0 (Fonte: Tortorella et al., 2021)

Come si può notare dalla rappresentazione del modello, le pratiche di Lean Production vengono suddivise in tre sottocategorie: pratiche applicate nei confronti dei fornitori (consegne JIT, sviluppo dei rapporti con i fornitori), dei clienti (coinvolgimento dei clienti) e dei processi interni (pull automatizzato, flussi dei materiali e delle informazioni, riduzione dei tempi di setup, controllo del processo, coinvolgimento degli operatori e manutenzione). Per quanto riguarda le tecnologie relative a Industria 4.0, queste sono identificate in due sottocategorie: tecnologie prevalentemente orientate ai processi (macchine con interfacce digitali e sensori, controllo remoto della produzione con MES, sensori per l'identificazione dei prodotti, sistemi informativi integrati e collaborativi) e tecnologie orientate al prodotto e servizio (Stampa 3D, Realtà Aumentata, Big Data, Cloud, IoT).

Applicando i vincoli esposti precedentemente e considerando solo i valori positivi delle correlazioni a coppie, le relazioni significative vengono verificate da 31 pratiche Lean e 8 tecnologie digitali. Come risultato importante di questa indagine, si ritiene utile segnalare che la maggioranza delle tecnologie applicate, 5 sulle 8 totali, sono quelle orientate ai processi e trovano maggiore correlazione nelle

sottocategorie coinvolgimento dei clienti (11), controllo digitale dei processi (10), coinvolgimento degli operatori (8) e manutenzione (10).

Nel modello vengono poi analizzati gli strumenti digitali che abilitano le pratiche Lean nelle sottocategorie dei fornitori, clienti e processi interni. Per quanto riguarda le pratiche Lean che coinvolgono i fornitori, sono gli strumenti quali applicazione di interfacce grafiche, applicativi MES e sistemi informativi integrati e collaborativi, che garantiscono una trasmissione dei dati in tempo reale, favorendo il principio di consegna Just-in-Time e sviluppando la collaborazione in ottica win-win. Dal punto di vista del coinvolgimento dei clienti, al fine dell'analisi delle loro esigenze, risulta preponderante l'uso di interfacce integrate con i sensori e di sistemi integrati e collaborativi, che consentano di condividere informazioni in tempo reale così da poter soddisfare le specifiche esigenze nella realizzazione di prodotti sempre più personalizzati. Infine, relativamente ai processi interni, emergono applicazioni tecnologiche differenti sulla base delle diverse tipologie di metodi e strumenti Lean analizzati: l'automazione della produzione Pull si ottiene applicando dei sistemi informativi integrati e connessi con la produzione, attraverso l'utilizzo dello strumento e-Kanban, in grado di rendere intelligente il flusso delle informazioni e dei materiali e favorire così le logiche Just-in-Time; nella riduzione dei tempi di setup prevalgono le relazioni dei sistemi integrati con i sensori e l'applicazione della realtà aumentata; nel controllo digitale dei processi intervengono maggiormente gli applicativi MES e le interfacce grafiche integrate con i sensori; per il coinvolgimento degli operatori si può fare ricorso all'uso di sensori e interfacce grafiche, andando così a potenziare il principio dell'Andon, poiché essi sono agevolati nell'individuazione degli errori e maggiormente coinvolti nel processo decisionale; infine, l'implementazione di sistemi di controllo remoti con applicativi MES e l'uso di sensori di automazione nelle pratiche di manutenzione è in grado di supportare il controllo sullo stato delle macchine, aumentando il tempo di lavoro disponibile e, di conseguenza, l'efficienza produttiva (Tortorella et al., 2021)⁵⁸.

Secondo quanto emerge nel caso studio preso in esame, si può dunque affermare che esiste un legame sinergico che fa coesistere le pratiche associate ai paradigmi

⁵⁸ *Ibidem*

Lean con le Tecnologie Abilitanti di Industria 4.0. Questa sinergia fa notare come tali pratiche, adottate dalle aziende manifatturiere oggetto dello studio, siano orientate maggiormente all'ottimizzazione dei processi e in maniera più debole al miglioramento del prodotto o servizio. Tale legame evidenzia che le pratiche di Lean Management e di Industria 4.0 hanno molti punti in comune, avendo entrambi i paradigmi l'obiettivo di aumentare la produttività, attraverso un orientamento al miglioramento dei processi, ponendo attenzione al valore che viene offerto al cliente (Considi, 2023)⁵⁹.

Per perseguire questo obiettivo, quindi, è necessario implementare prima di tutto una diffusa cultura Lean all'interno dell'organizzazione, in modo da avere processi solidi e strutturati, con standard ben definiti, andando così a ridurre gli sprechi nei processi e favorire l'integrazione orizzontale tra i vari membri della catena. L'organizzazione Lean costituisce la base iniziale su cui implementare successivamente le Tecnologie Abilitanti in modo efficiente, evitando che gli sprechi vengano digitalizzati e aumentando al tempo stesso la diffusione delle pratiche Lean in modo capillare in azienda e l'efficacia dei principi cardine Just-in-Time e Jidoka (Rosin et al., 2020)⁶⁰. Sintetizzando i benefici di questo legame, tra gli sviluppi tecnologici più significativi, si può dire che la velocità delle informazioni all'interno della produzione Pull viene significativamente migliorata, attraverso l'implementazione dell'IIoT che abilita la raccolta e l'analisi dei Big Data provenienti dai processi. Questo rende il sistema produttivo più flessibile e capace di soddisfare le esigenze specifiche dei clienti, andando verso la personalizzazione di massa. Inoltre, la riduzione degli sprechi viene potenziata dall'applicazione di Simulazione e Realtà Aumentata, che portano benefici in termini di aumento della qualità all'interno delle stazioni di lavoro e rafforzamento delle tecniche di Visual Management, ottenendo così un monitoraggio e un'ottimizzazione continua dei processi. In ultima analisi, l'inter-connettività e l'analisi in tempo reale dei dati permette alle aziende di aumentare la qualità dei prodotti, l'efficienza e la produttività.

⁵⁹ Considi, www.considi.it/lean-organization

⁶⁰ Rosin F., Forget P., Lamouri S., Pellerin R., 2020, Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles, *International Journal of Production Research*, vol. 58, n. 6, pp. 1644-1661.

Di fianco ai molteplici vantaggi appena discussi, legati principalmente all'incremento di produttività, è altresì importante considerare alcune limitazioni e criticità che emergono dall'implementazione delle tecnologie digitali. In primo luogo, la loro applicazione ha un impatto limitato nel principio cardine del Genchi Genbutsu e nei processi di decision making e di problem solving, trascurando la creatività e il pensiero critico dell'operatore che rappresentano invece elementi fondanti per l'approccio Lean. Infatti, con l'automazione dei processi decisionali viene meno il coinvolgimento delle persone nella risoluzione dei problemi, con una diminuzione della percezione di engagement. In aggiunta, la realizzazione dei paradigmi di Industria 4.0 porta con sé una forte componente di complessità, poiché richiede spesso importanti investimenti economici e sforzi implementativi da parte delle aziende (Reddy et al., 2024)⁶¹. Sul piano economico, nonostante gli incentivi governativi a favore dello sviluppo della digitalizzazione, specie per le PMI, questa spesa in tecnologie può risultare scarsamente accessibile e pertanto difficilmente giustificabile in ottica di ritorno dell'investimento. Oltretutto, sono richieste competenze specialistiche che non appartengono al know-how dell'azienda e sono quindi da ricercare esternamente.

A tutto ciò, va aggiunta infine una considerazione sull'elevato grado di consumo energetico da parte dei dispositivi digitali e dei centri di elaborazione dei dati, che rende necessario fare dei ragionamenti in termini di riduzione del dispendio energetico. Questo pone in primo piano la necessità di adottare pratiche industriali sostenibili per l'ambiente e modelli di business di economia circolare.

In conclusione, risulta evidente come la coesistenza tra l'uomo e le tecnologie, sviluppatasi negli ultimi decenni, abbia portato numerosi vantaggi accompagnati da importanti sfide per gestirne la complessità. In tempi recenti si è reso sempre più necessario vedere le tecnologie di Industria 4.0 da un punto di vista più ampio, che non consideri solo la produttività ma l'intero contesto sociale in cui opera l'azienda. Le attuali sfide e crisi globali hanno messo in luce fragilità e debolezze delle catene di approvvigionamento, accelerando la necessità di dare alla digitalizzazione una nuova declinazione in un'ottica di collaborazione e sostenibilità. L'attenzione al legame tra Industria 4.0 e sostenibilità dovrà tenere sempre più conto del ruolo

⁶¹ *Ibidem*

decisionale e della responsabilità dell'uomo attraverso il pensiero critico e creativo e dell'interazione tra automazione ed esseri umani. Questi temi verranno sviluppati nel prossimo capitolo introducendo il concetto di Industria 5.0.

CAPITOLO 3

La transizione verso Industria 5.0

Il terzo capitolo si focalizza sull'evoluzione dei principi di Industria 4.0 che, integrando la prospettiva economica con quella sociale e ambientale, portano alla nascita di Industria 5.0, dove le tecnologie sono al servizio dell'uomo. Si presentano i valori fondanti del paradigma di Industria 5.0, il ruolo di rilievo delle pratiche Lean per l'implementazione dei principi di sostenibilità e il loro impatto sulle soluzioni di automazione, approfondendo tramite un'analisi costi-benefici la metodologia LCA.

3.1 L'evoluzione da Industria 4.0 a Industria 5.0

Il paradigma di Industria 4.0, a partire dalla sua diffusione iniziata nel 2011, ha trovato ampia e crescente applicazione nel settore produttivo, portando importanti benefici in termini di crescita economica delle aziende. Tuttavia, negli ultimi anni sono emerse in modo sempre più evidente alcune limitazioni, in quanto lo sviluppo tecnologico non è pensato per affrontare le richieste derivanti da fattori sociali e ambientali, che rappresentano temi di primaria attenzione specie nello scenario attuale caratterizzato da grandi cambiamenti a livello globale. Con queste premesse, si rende necessaria una riflessione che porti alla ridefinizione delle pratiche che impattano nel modello produttivo ed economico. L'emergere di nuovi trend nel settore industriale, pertanto, spinge il paradigma di Industria 4.0 verso un'evoluzione che porta a definire 4 nuove tendenze in grado di influenzare il contesto in cui le aziende operano, sottolineando in modo più evidente alcune limitazioni della Rivoluzione Digitale (Reddy et al., 2024)⁶².

- Adozione di pratiche sostenibili: si pone maggiore attenzione a livello globale nell'adozione di pratiche di produzione che siano sostenibili sia da

⁶² Reddy C.K.K., Anisha P.R., Khan S., Hanafiah M.M., Pamulaparty L., Mohana R.M., 2024, *Sustainability in Industry 5.0*, CRC Press, Florida.

un punto di vista ambientale che economico, andando di conseguenza a ridefinire i modelli di business.

- Visione umano-centrica: nasce la necessità di spostare il focus dall'automazione pura al ruolo dell'uomo nei processi produttivi; questo si nota attraverso l'emergere dello sviluppo negli ultimi anni dei Cobot, idonei a instaurare un rapporto collaborativo tra uomo e macchina.
- Sviluppo di tecnologie avanzate: lo sviluppo delle tecnologie digitali e la loro implementazione ha reso possibile uno sviluppo esponenziale di sistemi quali Intelligenze Artificiali e Gemelli Digitali, nell'ottica di portare un miglioramento sostenibile dell'efficienza produttiva e della manutenzione predittiva.
- Fattori sociali e globali: rapidi e improvvisi mutamenti degli eventi globali, come pandemie e guerre, hanno portato in primo piano le fragilità delle catene di approvvigionamento, aumentando la necessità delle opportunità abilitate dalla trasformazione digitale in termini di diversificazione e *reshoring*⁶³ delle produzioni.

Sulla spinta di queste nuove tendenze, quindi, la necessità di un'evoluzione del paradigma di Industria 4.0 sposta l'attenzione dalla pura redditività economica verso una dimensione dell'industria sostenibile e su misura per l'uomo, in cui le tecnologie sono al servizio delle persone.

Già nel 2017, in Giappone, questi principi vengono espressi per la prima volta dall'ex Primo Ministro giapponese Shinzo Abe, attraverso il concetto di Società 5.0; questo termine identifica un progetto governativo giapponese in cui si mira ad estendere la digitalizzazione e l'innovazione oltre la fabbrica, creando un ecosistema capace di integrare il mondo digitale e fisico, che porti beneficio anche a livello sociale attraverso il miglioramento della vita delle persone e ambientale mediante un consumo sostenibile delle risorse (Cappelozza e Dal Pozzo, 2023)⁶⁴. Con l'estensione di questo concetto anche in Europa, si diffonde l'esigenza di dare una nuova declinazione al paradigma di Industria 4.0, attraverso un'integrazione

⁶³ *Reshoring*: fenomeno economico che consiste nel rientro delle attività produttive, precedentemente delocalizzate, presso il paese di origine.

⁶⁴ Cappelozza F., Dal Pozzo G., 2023, L'industria per la società 5.0 – Verso una società Umano-centrica, Sostenibile e Resiliente, *MIT Sloan Management Review Italia*, n. 3, pp. 4-13.

dell'uomo con le tecnologie digitali, in una logica maggiormente umano-centrica. Nel 2021, attraverso l'approvazione del documento "Industria 5.0: verso un'industria europea sostenibile, umano-centrica e resiliente", la Commissione Europea dà il via al Piano Industria 5.0 dove, su ispirazione dei principi giapponesi di Società 5.0, per la prima volta appare il termine Industria 5.0 (Khuzaini et al., 2024)⁶⁵.

Con il termine Industria 5.0 si intende una nuova declinazione delle logiche di Industria 4.0, focalizzate sul ruolo centrale dei dati e dello sviluppo tecnologico, riconoscendo alle tecnologie digitali un ruolo che va oltre il mero obiettivo incentrato sull'aumento di produttività in favore di uno scopo più ampio di benessere sociale e organizzativo. Attraverso un riadattamento dei processi, questo rende necessario porre al centro la realizzazione di un sistema produttivo collaborativo e incentrato sulle esigenze degli operatori, che rispetti l'ambiente e che ponga il ruolo delle persone al centro dei processi produttivi. Nel nuovo sistema, le tecnologie non sostituiscono l'uomo bensì lo affiancano nello svolgimento delle operazioni, aumentandone al contempo l'engagement. Ne consegue la realizzazione di processi industriali focalizzati sul coinvolgimento e benessere delle persone, progettati per garantire una maggiore continuità e flessibilità alle aziende nel superamento delle crisi e orientati a ridurre il loro impatto a livello ambientale attraverso lo sviluppo di modelli di business sostenibili. Industria 5.0 non raffigura, quindi, l'avvio di una nuova rivoluzione industriale, bensì integra ed estende i concetti di Industria 4.0, dando origine a un sistema ibrido: da un lato, le tecnologie di Industria 4.0 continuano a garantire un incremento di efficienza e un controllo veloce dei processi supportato dall'automazione; dall'altro, le logiche di Industria 5.0 supportano nel fronteggiare le nuove e complesse sfide globali, attuando un processo decisionale responsabile che porta sia a un controllo sicuro dei processi produttivi automatizzati che a un'automazione collaborativa e sostenibile (Golovianko et al., 2023)⁶⁶. Per rendere

⁶⁵ Khuzaini., Irpan M., Shaddiq S., 2024, Industry 4.0 and Industry 5.0 - Inception, Conception, Perception, and Rethinking Loyalty Employment, *International Journal Of Economics, Management, Business and Social Science*, vol. 4, n. 1, pp. 95–114.

⁶⁶ Golovianko A. M., Terziyan V. B., Branytskyi V. A., Malyk D., 2023, Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-existence, Transition, or a Hybrid, *4th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing*.

tutto questo attuabile, l'uomo assume un ruolo centrale per le sue abilità fondamentali di pensiero critico e creatività nella risoluzione di problemi complessi e capacità di comunicazione e collaborazione con le macchine all'interno della fabbrica.

Per il raggiungimento degli obiettivi di flessibilità e reattività che si pone Industria 5.0, l'applicazione dei principi del Lean Management assume un ruolo di rilievo, così come si è dimostrato esserlo per Industria 4.0. Infatti, come già descritto nel primo capitolo, i principi stessi del Toyota Production System, in particolare dello Jidoka, stabiliscono l'importanza della figura dell'operatore, che assume un ruolo da protagonista attraverso il potere decisionale di fermare il processo produttivo in caso di anomalie e la capacità di separarsi dalla macchina per dedicare il suo tempo in attività di miglioramento continuo. Anche sul fronte della sfida all'efficientamento energetico e alla sostenibilità, il pensiero snello assume una posizione decisiva, attraverso l'impegno costante alla riduzione degli sprechi. In sintesi, Industria 5.0 integra i paradigmi di Industria 4.0, rimanendo nei confini della Quarta Rivoluzione Industriale, ponendosi come obiettivo la realizzazione di un modello industriale che pone al centro il ruolo e il benessere del lavoratore, la realizzazione di processi resilienti e una produzione più sostenibile. Questi rappresentano i paradigmi fondanti oggetto di trattazione del prossimo paragrafo.

3.2 I valori fondamentali di Industria 5.0

Il paradigma di Industria 5.0 non è un modello *technology-driven*, guidato unicamente dallo sviluppo tecnologico che caratterizza Industria 4.0, bensì è di tipo *value-driven*, ossia guida la trasformazione digitale basandola su valori precisi, che ne costituiscono i tratti distintivi e sono tra loro interconnessi. Sono tre i valori fondamentali che caratterizzano questo nuovo paradigma (Khuzaini et al., 2024)⁶⁷: umano-centrismo, resilienza e sostenibilità (Fig. 3.1).

⁶⁷ *Ibidem*



Fig. 3.1 I tre valori fondamentali di Industria 5.0 (Fonte: Khuzaini et al., 2024)

Si ritiene importante ribadire che Industria 5.0 affronta le nuove sfide caratterizzanti il contesto industriale assumendo un approccio sistemico, che utilizza le tecnologie digitali non soltanto per perseguire la profittabilità delle aziende, ma tenendo in considerazione soprattutto gli aspetti sociali riguardanti le persone che compongono le organizzazioni e l'ambiente in cui le aziende si trovano a operare e interagire. Si fondano su questi aspetti i 3 tratti caratteristici del paradigma di Industria 5.0, che vengono di seguito analizzati nel dettaglio (Khuzaini et al., 2024)⁶⁸.

- **Umano-centrismo:** lo spostamento dell'attenzione verso un approccio incentrato sull'uomo fa sì che i processi produttivi siano costruiti tenendo conto delle sue necessità, ossia rivalutando il ruolo dell'operatore, che viene considerato non più come un semplice costo bensì come un investimento per l'azienda. In questo contesto, le tecnologie digitali devono adattarsi alle esigenze del lavoratore e non viceversa, ripensando al rapporto uomo-macchina in un'ottica di collaborazione. Un effetto diretto lo si può vedere con la sempre maggiore diffusione nelle linee produttive dei Cobot, che lavorano in concomitanza con l'operatore, unendo intelligenza umana e produttività tipica dei robot. In particolare, i Cobot vengono pensati per agevolare le condizioni di benessere ed ergonomia dell'operatore, sgravandolo dal sollevamento di componenti pesanti e automatizzando le

⁶⁸ *Ibidem*

attività ripetitive. Inoltre, costituiscono un'ambiente di lavoro sicuro, interagendo in tempo reale con gli spostamenti dell'operatore e garantendo un elevato grado di precisione nello svolgimento dei vari task. Per quanto riguarda le competenze che apprende l'operatore, queste sono potenziate dalle tecnologie digitali e finalizzate al miglioramento del suo lavoro, al contrario della prospettiva di Industria 4.0 in cui le competenze apprese sono viste unicamente con il fine di un miglior funzionamento dell'implementazione delle tecnologie (Reddy et al., 2024)⁶⁹.

Essendo le tecnologie al servizio dell'operatore, con evidenti benefici in termini sia di competenze e che di miglioramento ergonomico nella postazione di lavoro, diventa evidente il modo rinnovato in Industria 5.0 di concepire lo sviluppo tecnologico digitale, consentendo la creazione di un equilibrio tra la figura dell'uomo e dell'automazione associata all'Industria 4.0. Ne consegue un rafforzamento dell'importanza della figura dell'operatore all'interno dei processi produttivi, nonostante i progressi esponenziali delle tecnologie portino ad aumentare il livello di automazione. Infatti, anche nei processi altamente automatizzati sono spesso presenti attività manuali, come ad esempio nelle fasi di assemblaggio o di saldatura, che per la loro natura complessa e imprevedibile richiedono la manualità dell'operatore (Ansari e Bajaj, 2023)⁷⁰.

Nell'approccio umano-centrico, viene riconosciuto l'elevato contributo al valore aggiunto della figura umana nei processi produttivi, in virtù delle capacità decisionali, della creatività nella risoluzione dei problemi e dell'intelligenza emotiva che responsabilizzano l'uomo e lo contraddistinguono dalle macchine, le quali sono appunto mancanti di queste particolari caratteristiche. Si consideri come esempio particolarmente significativo quello dei processi decisionali, nei quali l'uomo è favorito dalla raccolta e dall'analisi dei dati garantita dalle tecnologie come IoT e Big Data, che propongono le possibili soluzioni migliori; questi dati tuttavia, a volte, possono dare origine a estrapolazioni

⁶⁹ *Ibidem*

⁷⁰ Ansari I. A., Bajaj V., 2023, IoT for Industry 4.0: performance monitoring in manual production, *Advanced Signal Processing for Industry 4.0*, vol. 2, n. 1, IOP Publishing.

distorte che soltanto la ragion critica umana e l'esperienza di comprensione e interpretazione possono stabilire quale sia la scelta più appropriata.

- **Resilienza:** a seguito degli improvvisi cambiamenti a livello geopolitico e alla manifestazione di nuove emergenze naturali, risulta sempre più importante il concetto di resilienza sia all'interno dei processi industriali che lungo l'intera catena di approvvigionamento. Per resilienza si intende la capacità di un sistema produttivo di garantire le risorse necessarie per il suo funzionamento, in ambienti stressati da condizioni interne o esterne, riuscendo a mitigarne gli effetti attraverso una sequenza di collaborazioni durature tra esseri umani, tecnologie digitali e automazioni di basso livello (Golovianko et al., 2023)⁷¹. Per essere definito resiliente, un sistema deve rispettare alcune caratteristiche ben definite: essere flessibile e reattivo, capace di scendere a compromessi tra i sottosistemi, adattandosi alle mutevoli condizioni, e infine aperto all'apprendimento e alla diversità che caratterizza i contesti complessi.

Nel contesto di Industria 5.0, la resilienza rappresenta un aspetto di grande complessità, in quanto tiene conto non solo della vulnerabilità delle infrastrutture e delle tecnologie digitali legate all'automazione, bensì anche di tutti i rapporti collaborativi che si creano tra uomo-uomo, macchina-macchina, macchina-uomo e uomo-macchina. Risultano essenziali, quindi, le modalità con cui le tecnologie digitali e l'uomo riescono a cooperare, attraverso la disponibilità e l'elaborazione di informazioni in tempo reale abilitate dai sistemi IoT e dall'Intelligenza Artificiale, e la conseguente capacità dell'uomo di prendere decisioni in ambienti complessi che richiedono un elevato grado di reattività. Tutto questo è in grado di garantire un funzionamento dei processi sostenibile e sicuro.

- **Sostenibilità:** definita come la condizione che consente di creare uno sviluppo economico e industriale che possa soddisfare le esigenze delle generazioni presenti, senza compromettere lo sviluppo di quelle future

⁷¹ *Ibidem*

(Dieste e Panizzolo, 2018)⁷². Per rendere attuabile lo sviluppo sostenibile, è necessario agire sui tre principi fondamentali della sostenibilità: economico, sociale e ambientale. In linea con questi e attraverso l'uso delle tecnologie digitali, Industria 5.0 si pone l'obiettivo primario di guidare la crescita economica delle aziende garantendo una produzione sostenibile, rispettosa dell'ambiente e in grado di generare benessere sociale.

Inoltre, il paradigma di Industria 5.0, attraverso il bilanciamento delle scelte di massimizzazione del profitto con le tematiche di protezione e prevenzione ambientale, è in linea con gli obiettivi di sviluppo sostenibile, istituiti dalle Nazioni Unite, detti SDGs (*Sustainable Development Goals*), da perseguire entro il 2030; tra questi, i propositi di Industria 5.0 trovano particolare affinità con gli obiettivi SDG7 di produzione di energia pulita e conveniente, SDG12 per una produzione e un consumo energetico responsabile e SDG13 per le azioni a favore dei cambiamenti climatici (Reddy et al., 2024)⁷³.

Perseguire l'obiettivo dello sviluppo di una produzione sostenibile implica la necessità di attuare accorgimenti innanzitutto in termini di efficientamento delle risorse e ottimizzazione energetica, attraverso la riduzione degli sprechi e delle emissioni di CO₂. Per fare ciò, le tecnologie digitali e l'automazione, quali l'utilizzo di IoT e sensori, offrono un contributo rilevante, consentendo il monitoraggio continuo e in tempo reale dei consumi energetici dei processi produttivi e aumentandone allo stesso tempo il rendimento. Infatti, l'ottimizzazione dei processi attraverso le analisi predittive, con l'individuazione dei processi ad alto consumo, impatta sulla prevenzione di eventuali sprechi di materiali e risorse. L'utilizzo delle tecnologie digitali, in particolare dell'IoT, dell'Intelligenza Artificiale, dei Big Data e dei Cobots, consente quindi un approccio proattivo nella presa di decisioni, a favore sia dell'ambiente che della

⁷² Dieste M., Panizzolo R., 2018, On the Relationship between Lean Practices and Environmental Performance, *9th International Conference on Environmental Science and Development*, IOP Publishing.

⁷³ *Ibidem*

produttività, attraverso un utilizzo ottimale dell'energia, dei materiali e delle risorse umane, che determina in ultima analisi una riduzione dei costi.

Come considerazione finale, la sostenibilità implica l'adozione di modelli di business innovativi, come quelli di economia circolare, che si focalizzano sull'eliminazione degli sprechi quali causa dell'inquinamento, sulla scelta di partnership con fornitori e produttori che impiegano materiali sostenibili, sulla progettazione di prodotti in un'ottica di riutilizzo al fine vita e, infine, sulla selezione accurata delle metodologie di trasporto per ridurre le emissioni di CO2.

I tre elementi appena descritti rappresentano l'essenza di Industria 5.0, che segna una nuova declinazione dello sviluppo tecnologico portato da Industria 4.0, prendendo in considerazione gli aspetti trascurati da quest'ultimo. In particolare, la visione incentrata sull'uomo, la resilienza e la sostenibilità consentono di incrementare la produttività delle aziende, promuovendo l'innovazione e il ruolo che queste hanno nei confronti della società e dell'ambiente. Per mettere a terra questi principi, le aziende non possono più prescindere dall'adottare pratiche industriali sostenibili che abilitano una strategia mirata alla gestione efficace ed efficiente delle risorse. L'uso efficiente delle risorse si traduce in una continua ricerca e riduzione degli sprechi che rappresenta l'essenza dell'approccio Lean Management. A questo punto, la trattazione nei successivi paragrafi prosegue con la messa in luce delle pratiche Lean che contribuiscono all'implementazione di Industria 5.0, con particolare attenzione al tema della sostenibilità.

3.3 Il ruolo del Lean Management nella Sostenibilità

Il Lean Management svolge un ruolo importante nell'implementazione dei principi di umano-centrismo, resilienza e sostenibilità che caratterizzano Industria 5.0. In particolare, le pratiche Lean hanno un forte parallelismo con il principio di sostenibilità, che viene spesso definito in letteratura con il binomio "Lean e Green" (Dieste e Panizzolo, 2018)⁷⁴. In entrambi risulta forte ed evidente la propensione

⁷⁴ *Ibidem*

alla ricerca e riduzione degli sprechi, che implica a sua volta una diminuzione dei costi al fine di aumentare la produttività. Inoltre, attraverso il principio di sostenibilità, il concetto di flusso del valore viene ampliato all'intera catena di approvvigionamento, dalla progettazione fino al riutilizzo alla fine del ciclo di vita, ed esteso a due elementi fondamentali: l'efficienza delle risorse e l'efficienza energetica. Per quanto riguarda l'efficienza delle risorse, si intende un approccio che mira a ridurre l'uso delle risorse naturali, come l'acqua e il gas naturale, all'interno dei processi produttivi; questa efficienza viene espressa come rapporto tra il beneficio che si vuole andare a ottenere e l'input di risorse necessarie per ottenerlo. In un'ottica di ottimizzazione, l'aumento di efficienza si ottiene attraverso una diminuzione delle risorse in input, che porta a una riduzione degli impatti negativi sull'ambiente. Con efficienza energetica, invece, si fa riferimento alla diminuzione del consumo energetico a parità di produzione di una determinata quantità di prodotto. Questa è diventata un fattore importante di vantaggio competitivo per le aziende produttive che devono certificare il risparmio nella produzione di CO₂ attraverso il meccanismo dei certificati bianchi; infatti, maggiore è l'efficientamento energetico raggiunto, minori diventano i costi legati all'acquisto dei certificati bianchi per adempiere agli obblighi normativi di raggiungimento della soglia minima di risparmio energetico.

I punti di contatto della sostenibilità con le pratiche di Lean Management sono molteplici, specie per quanto riguarda gli aspetti che la caratterizzano in termini di (Bertagnolli, 2022)⁷⁵:

- efficienza, attraverso l'ottimizzazione dei processi dal punto di vista energetico che trova collegamento con la caccia ed eliminazione degli sprechi
- sufficienza, tramite l'uso dell'energia e delle risorse strettamente necessarie alla produzione che porta alla riduzione delle scorte e, di conseguenza, ad una diminuzione dei costi
- consistenza e resilienza nell'utilizzo delle risorse, garantendo la continua disponibilità dei materiali anche in condizioni di mercato avverse, che si

⁷⁵ Bertagnolli F., 2022, *Lean Management Introduction and In-Depth Study of Japanese Management Philosophy*, Springer, Pforzheim.

collega con la capacità del paradigma Lean di progettare processi robusti e flessibili.

Ulteriori riscontri del legame tra Lean e sostenibilità sono evidenti nel principio della lotta ai 7 Muda, che caratterizzano il Lean Management e sono paragonabili agli sprechi rilevabili in ambito energetico. Ad esempio, la sovrapproduzione può essere vista come maggiore disponibilità energetica rispetto al reale bisogno, le scorte come riscaldamento o raffreddamento eccessivo delle merci stoccate, l'inefficienza come mancanza di isolamento termico, i trasporti come perdite energetiche nel trasporto di energia, le attese come funzionamento non necessario dei macchinari durante i periodi di non produzione, le rilavorazioni dei componenti difettosi come consumo ulteriore di energia per consentire le riparazioni e i sovrprocessi come ventilazione e illuminazione di ambienti non in uso.

In questo contesto, le pratiche Lean consentono di supportare l'efficienza nell'utilizzo delle risorse attraverso la progettazione e realizzazione di processi produttivi snelli, in grado di diminuire gli sprechi legati non soltanto alla fabbricazione del prodotto ma anche al consumo energetico, incidendo in modo significativo sull'aumento di qualità e produttività. L'approccio Lean, infatti, ha un impatto diretto sui tre pilastri della sostenibilità: per quanto riguarda la sostenibilità economica, la riduzione dei costi e degli sprechi energetici nella fabbricazione del prodotto consentono un periodo di ammortamento e di ritorno dell'investimento più breve; sul piano della sostenibilità sociale, viene posta l'attenzione sul benessere dell'operatore e in particolare sugli aspetti di sicurezza ed ergonomia delle postazioni di lavoro, andando a preservare la forza lavoro; infine, dal punto di vista della sostenibilità ambientale, emerge il tema della riduzione degli sprechi di materiali e di energia oltre all'utilizzo di materiali riciclati in un'ottica di economia circolare (Bertagnolli, 2022)⁷⁶.

Sono numerosi gli strumenti e le metodologie Lean che supportano l'efficienza energetica e delle risorse caratterizzanti la sostenibilità lungo tutta la catena di fornitura, a partire dai processi a monte, passando per i processi interni alla fabbrica, fino ad arrivare a valle dall'utilizzo del prodotto all'ultima fase del suo ciclo di vita.

⁷⁶ *Ibidem*

Questo insieme di metodologie e il relativo impatto nelle diverse fasi della catena di approvvigionamento è ben rappresentato in Fig. 3.2, dove sono raffigurate le varie tecniche Lean che incidono sulla gestione dell'efficienza della produzione (dentro la fabbrica), della fornitura (a monte della fabbrica) e della domanda (a valle della fabbrica).

Di seguito, la trattazione continua con la descrizione ed esemplificazione dei diversi elementi raffigurati (Bertagnolli, 2022)⁷⁷.

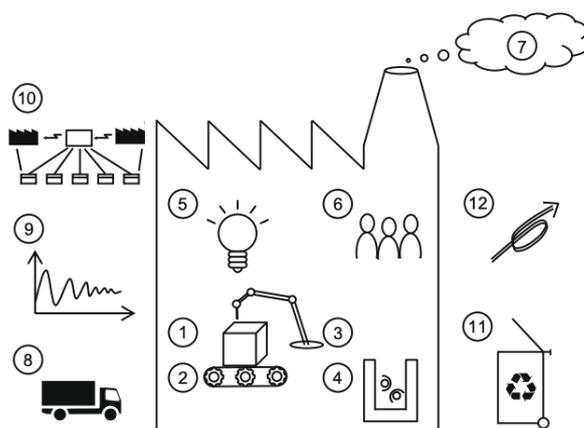


Fig. 3.2 Impatto dei metodi Lean nell'efficientamento energetico e delle risorse lungo la catena di fornitura (Fonte: Bertagnolli, 2022)

Partendo a monte della catena di fornitura, si può vedere come i metodi Lean trovano applicazione nell'ambito logistico (8) attraverso i principi di Just-in-Time e Pull, che consentono di effettuare le consegne in linea con le esigenze produttive e, di conseguenza, ridurre i livelli delle scorte all'interno della fabbrica, seppur richiedendo una collaborazione tra i vari membri della Supply Chain al fine di ottimizzare la quantità dei trasporti. Inoltre, i metodi di analisi, standardizzazione e stabilizzazione dei processi (9,10), quali VSM e Heijunka, garantiscono un bilanciamento e livellamento della domanda, evitando così picchi che porterebbero ad un consumo eccessivo di energia, e offrono una visione globale dei consumi energetici nei processi produttivi.

⁷⁷ Ibidem

Passando all'interno della fabbrica, i metodi Lean impattano fin da subito nelle fasi iniziali di progettazione (1), attraverso i metodi di *Design for X* (DF-X), che consentono di progettare il prodotto tenendo conto della scelta di materiali sostenibili, del peso delle parti per il trasporto e della facilità di disassemblaggio nella futura fase di riciclo.

All'interno della fase di produzione, entrano in gioco innanzitutto le tecniche di ottimizzazione dei processi, tramite logiche *one-piece flow* (3), che vanno a ridurre i livelli delle scorte e di occupazione delle aree di stoccaggio. Inoltre, la realizzazione di postazioni di lavoro con cella a U (4) consente di ottenere una produzione e impiego degli operatori flessibile, adattando la capacità produttiva alla domanda. Tramite questa tipologia di celle di lavoro, gli operatori effettuano meno movimentazioni e operano in un ambiente più sicuro ed ergonomico (6), seguendo il flusso del valore. In più, tramite i principi Lean di Jidoka e Poka-Yoke (5) si rileva un aumento del grado di qualità interna al processo, riducendo gli sprechi di materiale e le rilavorazioni dei pezzi.

Da ultimo, ma non per importanza soprattutto nel contesto di Industria 5.0, un ruolo di rilievo viene assunto dall'automazione dei processi (2) che nelle logiche dell'approccio Lean non viene esclusa, bensì sostenuta e realizzata tramite macchinari semplici e modulari che utilizzano poca energia (Kolberg e Zühlke, 2015)⁷⁸. Questi concetti si ritrovano in particolare nei sistemi intelligenti di automazione Lean che vanno sotto il nome di LCIA (*Low-Cost Intelligent Automation*).

Arrivando a valle della catena di fornitura, gli effetti prodotti dall'applicazione dei metodi Lean si riscontrano in termini di riduzione delle emissioni nocive nell'ambiente, attraverso l'eliminazione degli sprechi, l'ottimizzazione dell'uso dei materiali e dell'energia all'interno dei processi produttivi e l'applicazione di logiche di riciclo dei prodotti a fine vita (7,11). Infine, risulta importante valorizzare anche le metodologie Lean di *Change Management* (12) che, attraverso attività di formazione e coinvolgimento delle persone e una comunicazione efficace, promuovono la sensibilizzazione sulle tematiche legate alla sostenibilità.

⁷⁸ Kolberg D., Zühlke D., 2015, Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, n. 3, pp. 1870-1875.

Tutti i metodi Lean appena esaminati sono sintetizzati in Tab. 3.1, che mette in collegamento le tecniche associate ai vari ambiti applicativi all'interno della catena di fornitura, evidenziando esempi concreti in termini di efficientamento delle risorse ed energetico.

Tab. 3.1 Metodi Lean a supporto della sostenibilità (Fonte: Bertagnolli, 2022)

Topics	Lean methods	Examples
1. Product design	<ul style="list-style-type: none"> • DFX • Design for logistics • Design for repair • Design for recycling 	<ul style="list-style-type: none"> • Standard small parts • Standard tool • Material selection and material saving • Reuse • Optimization of the life cycle duration • Easy disassembly • Better transportability • Lightweight construction • Material substitution
2. Automation	<ul style="list-style-type: none"> • Karakuri • Low-cost intelligent automation 	<ul style="list-style-type: none"> • Less energy due to transport chutes • Simple machines and equipment • Reuse of machinery
3. Installations	<ul style="list-style-type: none"> • Quick changeover • One-piece flow 	<ul style="list-style-type: none"> • Inventory reduction • Reduction of storage and area
4. U-cells	<ul style="list-style-type: none"> • Flexible manpower system • Small machines 	<ul style="list-style-type: none"> • Shutting down entire cells when there is no demand • Flexible use of assembly cells • Less space
5. Quality	<ul style="list-style-type: none"> • Jidoka • Poka yoke 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduction of scrap and rework • No waste of material • Automatic system stop • No production of bad parts
6. Human	<ul style="list-style-type: none"> • Ergonomics 	<ul style="list-style-type: none"> • Fewer movements • Safe workplace
7. Energy	<ul style="list-style-type: none"> • Elimination of waste • Energy efficiency • Key figure CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • Energy flows, material flow cost analysis • Use of wasted heat • Key figure tracking and optimization • Analysis of compressed air network, search for leakages
8. Logistics and supply chain management	<ul style="list-style-type: none"> • Just-in-time • Pull principle • Variant reduction 	<ul style="list-style-type: none"> • Late formation of variants • Inventory reduction and area reduction • Less transport • Using the pull principle for resources: only get what is needed
9. Processes	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilization • Standards 	<ul style="list-style-type: none"> • Balancing of fluctuations • Leveled utilization of machines • Elimination of level peaks save maximum resource provisioning
10. Consideration of the overall process	<ul style="list-style-type: none"> • Value stream mapping • Shop floor management • Transparency 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualization of environmental issues • Sanky diagram • Visualize energy consumption • Combination of value stream with resource efficiency methods
11. Resource efficiency	<ul style="list-style-type: none"> • ninth type of waste • Recycling • Reuse 	<ul style="list-style-type: none"> • Waste reduction • Less offcut • Better material utilization • Sorting and use of residual materials
12. Change management	<ul style="list-style-type: none"> • Sensitization • Lean awareness 	<ul style="list-style-type: none"> • Communication measures • Training courses • Business games for resource efficiency

Nonostante sia appurato che i metodi Lean a supporto della sostenibilità producono effetti positivi in termini di miglioramento dei principali indicatori ambientali, quali emissioni atmosferiche, consumo di energia e riduzione dei rifiuti solidi, è importante aggiungere un'ulteriore considerazione con particolare riferimento all'effetto delle pratiche JIT. Se da un lato generano l'aumento della produttività e la riduzione delle scorte, dall'altro lato non si può trascurare come la maggior

frequenza delle consegne vada a peggiorare l'indicatore delle emissioni in atmosfera (Dieste e Panizzolo, 2018)⁷⁹. Questo aspetto, nel rapporto tra clienti e fornitori, rende necessaria un'attenta valutazione delle reali necessità legate alle consegne Just-in-Time al fine di bilanciarne gli effetti contrastanti. Resta poi inteso che valutazioni approfondite sono opportune non soltanto per questo metodo, bensì per tutte le varie pratiche Lean che, a fronte di benefici dal punto di vista della sostenibilità, presentano anche degli svantaggi e vanno quindi adottate sulla base delle reali esigenze aziendali.

Una volta appurata l'esistenza di un legame significativo tra automazione e principi di sostenibilità, la prima come elemento che caratterizza in modo marcato l'evoluzione di Industria 4.0 e la seconda come uno dei pilastri fondanti di Industria 5.0, si intende mettere in evidenza il ruolo fondamentale delle metodologie Lean nel rendere efficiente e sostenibile l'automazione. Il passaggio a questa nuova prospettiva è reso possibile dalla metodologia Low-Cost Intelligent Automation (LCIA), che sarà oggetto di approfondimento nel prossimo paragrafo.

3.4 Low-Cost Intelligent Automation

Uno degli strumenti di automazione più rilevanti nell'ambito del Lean Management è rappresentato dalla Low-Cost Intelligent Automation (LCIA), detta anche Low-Cost Automation (LCA). L'automazione intelligente a basso costo consente di automatizzare i processi attraverso l'utilizzo di tecnologie e sistemi di controllo semplici e di facile utilizzo, che non richiedono elevati costi d'acquisto e manutenzione e pongono attenzione sull'ergonomia dell'operatore. In linea con i principi Lean, punta a ridurre i tempi dei processi, eliminando gli sprechi e aumentando conseguentemente la produttività. Queste caratteristiche la rendono una metodologia particolarmente apprezzata tra le piccole e medie imprese, che molto spesso riscontrano nel costo e nella complessità delle soluzioni di Industria 4.0 uno sbarramento alla loro implementazione negli ambiti dell'assemblaggio e della logistica (Ansari e Bajaj, 2023)⁸⁰. Si pone come obiettivo, quindi, l'adozione

⁷⁹ *Ibidem*

⁸⁰ *Ibidem*

delle soluzioni di automazione per ridurre i costi e aumentare la produttività, con un risparmio significativo degli investimenti iniziali.

Una soluzione di automazione intelligente a basso costo, per essere definita tale e poterla implementare, deve rispettare una serie di requisiti caratterizzanti (Ansari e Bajaj, 2023)⁸¹:

- basso costo implica che l'investimento va completamente ammortizzato entro un anno dalla sua realizzazione
- realizzazione interna all'azienda attraverso laboratori di miglioramento continuo (cantieri kaizen), che coinvolgano i dipendenti e raccolgano idee per attuare soluzioni originali e creative
- rapida realizzazione e adattamento al processo produttivo del prodotto
- tempi di setup e manutenzione rapidi
- progettazione mediante il principio Poka-Yoke per prevenire eventuali errori di utilizzo
- impiego flessibile e modulare
- basso consumo energetico
- utilizzo di materiali economici o riciclati
- analisi e simulazione preventiva del processo, al fine di eliminare gli sprechi ed evitare di automatizzarli
- utilizzo di attuatori e meccanismi semplici
- ideazione finalizzata a garantire un ambiente di lavoro sicuro e aumentare l'ergonomia dell'operatore.

La seconda caratteristica in particolare, ovvero il fatto di essere soluzioni sviluppate all'interno dell'azienda, consente una conoscenza e una consapevolezza approfondita dei processi interni, portando ad un arricchimento delle competenze e del *know-how* dell'organizzazione (Bertagnoli, 2022)⁸². Questo importante aspetto si traduce nella reale messa a terra di soluzioni realizzate internamente su misura a seconda delle esigenze proprie delle funzioni di produzione, assemblaggio e logistica, che hanno tratti distintivi e di unicità per ogni azienda. Tutto ciò, si

⁸¹ *Ibidem*

⁸² *Ibidem*

traduce in fonte di rilevante vantaggio competitivo rappresentato dalla capacità di attuare soluzioni creative e uniche che, come tali, non possono essere acquistate nel mercato sotto forma di macchinari standard dai competitors. La metodologia LCA consente, dunque, di realizzare sistemi di automazione con costi d'acquisto inferiori rispetto all'acquisto di soluzioni complesse per l'automazione presenti nel mercato pur mantenendo le stesse funzionalità. Nella scelta tra l'adozione di una soluzione di automazione complessa tipica di Industria 4.0, come PLC (*Programmable Logic Controller*) o Robot, e una soluzione LCA realizzata attraverso sistemi di movimentazione e modifiche tecniche di strumentazioni disponibili basati su semplici principi fisici, risulta importante effettuare un'analisi dei costi e benefici per mettere in chiaro tutte le valutazioni del caso.

Analizzando in prima battuta i costi da sostenere per l'investimento in soluzioni di automazione, l'andamento mostrato in Fig. 3.3 suggerisce che questi dipendono sia dal livello di automazione, che può essere nullo ovvero manuale, parzialmente o completamente automatizzato, sia dal livello di sprechi interni al processo che dal livello di complessità (Bertagnolli, 2022)⁸³.

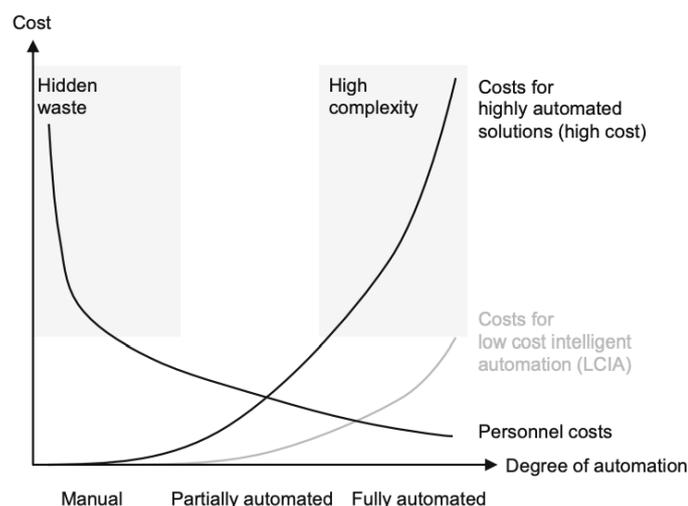


Fig. 3.3 Andamento dei costi d'investimento tra soluzioni di automazione tradizionali e LCIA (Fonte: Bertagnolli, 2022)

Per quanto riguarda le soluzioni manuali, si può notare come i costi che impattano maggiormente sono rappresentati dal costo del personale; in questo caso il livello

⁸³ *Ibidem*

di automazione è nullo, mentre risulta elevata la quota di sprechi nascosti nei processi. Andando verso l'adozione di soluzioni altamente automatizzate, il costo dell'investimento iniziale diventa elevato, così come il grado di complessità e rigidità di implementazione, mentre si abbassa la quantità di sprechi interni al processo.

In questo contesto, si inseriscono le soluzioni LCA, ponendosi come alternativa a quelle altamente automatizzate, pur garantendo le stesse funzionalità. Infatti, essendo realizzate internamente, queste soluzioni sono in grado di ridurre in modo significativo l'investimento iniziale, con un risparmio di costo dell'investimento nell'intorno dell'80% rispetto ad una soluzione altamente automatizzata e con un costo di realizzazione iniziale con un valore pari al 10% della medesima. Inoltre, avendo un basso costo d'implementazione e una maggiore flessibilità, si adattano anche alla realizzazione di piccoli lotti di produzione. A titolo di esempio si riporta un caso analizzato da Bertagnolli, in cui è stata presa in considerazione la modifica realizzata da alcuni dipendenti per l'ottimizzazione dei mezzi AGV; questi hanno aggiunto nella parte frontale una spazzola per fare in modo che la sporcizia non aumenti l'attrito nella rotaia di scorrimento del mezzo e interrompa così il suo percorso, rendendo anche più efficiente lo sgancio e l'aggancio dei rimorchi posteriori. Questo intervento realizzato internamente ha avuto un costo di soli € 4.000, a fronte di un costo di acquisto per un mezzo AGV maggiormente evoluto che ammonta a € 25.000, generando un risparmio dell'84% per ogni AGV (Bertagnolli, 2022)⁸⁴.

In un'ottica di analisi costi-benefici, all'interno delle voci di costo, oltre ai costi d'acquisto si devono considerare anche quelli di manutenzione, dell'energia e di utilizzo, che aumentano con l'incremento di complessità del sistema. Da questo punto di vista, ancora una volta, le soluzioni della metodologia Lean a basso costo presentano valori minori nei costi di gestione degli impianti, offrendo una maggiore semplificazione dei processi e dei sistemi d'implementazione. Ne consegue, che nella scelta di sviluppo del tipo di automazione, risulta necessario tenere conto dell'effetto complessivo che questa genera, confrontando il rapporto tra i benefici e i costi da sostenere per ottenerli, come mostrato in Fig. 3.4.

⁸⁴ *Ibidem*

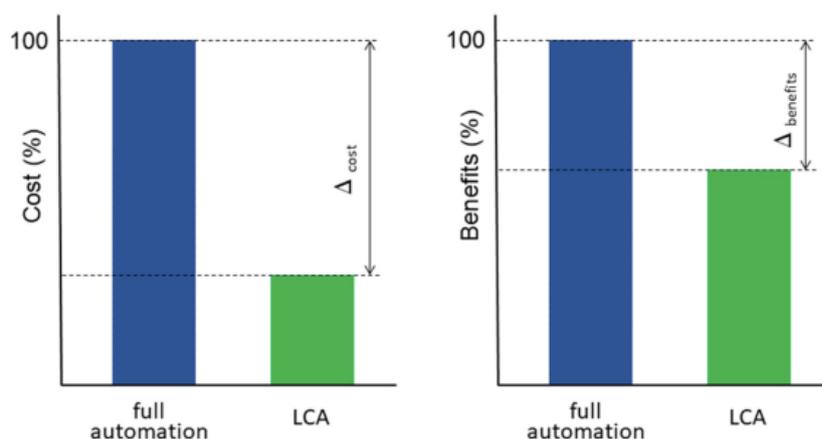


Fig. 3.4 Rapporto costi e benefici a confronto tra alta automazione e LCA
(Fonte: Ansari e Bajaj, 2023)

Per quanto riguarda i benefici, dal confronto tra le due tipologie di automazione emerge un *trade-off*: LCA porta con sé un minor costo e una maggiore semplicità di implementazione rispetto alle soluzioni altamente automatizzate, che però dal canto loro sono in grado di garantire un livello di controllo dei processi più elevato e costante (Ansari e Bajaj, 2023)⁸⁵. Come emerge dal confronto presente in figura, a fronte di un elevato livello di automazione, che consente un controllo costante del processo ma si scontra con la complessità e gli elevati costi, una soluzione LCA a minor costo, di più semplice implementazione, ma che perde nel grado di controllo del processo, risulta più conveniente nel rapporto tra benefici e costi ($\Delta \frac{\text{benefici}}{\text{costi}}$) fino a che la percentuale di riduzione dei costi resta significativamente maggiore alla percentuale di riduzione dei benefici, ossia fintanto che $\Delta\% \text{ riduzione costi} \gg \Delta\% \text{ riduzione benefici}$.

In linea generale, si può dire che il ruolo assunto dalla riduzione dei costi, coerentemente con i principi Lean, rende questa tipologia di automazione particolarmente accessibile per le aziende di piccole e medie dimensioni (PMI), offrendo loro nuove opportunità di business. Infatti, le PMI spesso non riescono ad accedere alle soluzioni di automazione offerte da Industria 4.0 a causa degli elevati investimenti, nonostante la presenza crescente di incentivi governativi.

⁸⁵ *Ibidem*

Per mettere a terra e realizzare le soluzioni di automazione LCA proposte dal Lean Management, si possono definire due tipologie di strategie implementative (Ansari e Bajaj, 2023)⁸⁶:

- la progettazione e realizzazione mediante componenti standard presenti nel mercato, ottenendo soluzioni di automazione che sfruttino sottosistemi pneumatici, elettrici o meccanici
- la progettazione e realizzazione di strutture semplici di automazione, mediante la metodologia cosiddetta Karakuri, che porta alla produzione di soluzioni di automazione che non utilizzano sottosistemi pneumatici ed elettrici, ma usano soltanto fonti energetiche derivanti dai principi fisici naturali come la gravità o il magnetismo.

Per concludere, la metodologia di automazione offerta da LCA, puntando all'obiettivo di diminuire gli investimenti degli impianti, ridurre gli sprechi e aumentare la produttività, si inserisce bene nel contesto dell'Industria 5.0, rispettando tutti i principi che la caratterizzano e, in modo particolare, i tre pilastri della sostenibilità: quello economico attraverso la riduzione dei costi, quello sociale sottolineando la centralità del ruolo delle persone e del loro benessere, infine quello ambientale proponendo soluzioni che non usano energie convenzionali. Unendo tutti questi presupposti, è proprio la metodologia Karakuri che ben si adatta al contesto di Industria 5.0 e si ritiene meritevole di particolare attenzione. Pertanto, a partire dal prossimo capitolo verranno approfondite caratteristiche e applicazioni dell'approccio Karakuri Kaizen.

⁸⁶ *Ibidem*

CAPITOLO 4

L'approccio Karakuri Kaizen

Questo capitolo entra nel vivo del Karakuri Kaizen come approccio di automazione LCA. Dopo aver introdotto la terminologia e le origini storiche, si presentano le caratteristiche e i principi di funzionamento. In seguito, si illustrano le linee guida per implementare le soluzioni Karakuri nei processi produttivi e logistici, passando poi all'integrazione con le tecnologie 4.0. Infine, vengono approfonditi i vantaggi e gli svantaggi per guidare le scelte di implementazione, presentando un nuovo modello.

4.1 Aspetti introduttivi e ricerca bibliografica

Nel contesto di Industria 5.0, le pratiche di automazione di tipo LCA assumono un ruolo particolarmente interessante. All'interno dell'automazione intelligente a basso costo, è proprio l'approccio Karakuri Kaizen che associa il concetto di automazione con quelli di efficienza e sostenibilità, creando un metodo alternativo per incrementare la produttività attraverso l'automazione sostenibile (Tan et al., 2023)⁸⁷.

Prima di dare una definizione dell'approccio Karakuri, si ritiene importante fare chiarezza sul significato del termine "automazione", con il quale si intende un processo il cui svolgimento è costituito da una serie di operazioni prestabilite, svolte in modo autonomo o con un basso intervento umano, attraverso l'uso di dispositivi dedicati. Entrando nel dettaglio, un'automazione è solitamente composta da tre componenti principali (Anggrahini et al., 2020)⁸⁸:

⁸⁷ Tan H. K., Katayama H., Manickavasagam S., 2023, What is Karakuri Kaizen and Hoe Does it Work?, *Proceedings of the 11th International Conference on Production Research-Americas*, pp. 25-32.

⁸⁸ Anggrahini D., Prasetyawan Y., Diartiwi S. I., 2020, Increasing Production Efficiency using Karakuri Principle (A Case Study in Small and Medium Enterprise), *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 852.

- sensore, particolare dispositivo che identifica il dato di input del processo e interagisce direttamente con il sistema convertendo uno stimolo fisico (temperatura, pressione, forza) in forma di misura leggibile per l'utente; ne esistono diverse tipologie tra cui termico, meccanico, elettrico e magnetico;
- analizzatore, costituisce il componente che in base all'analisi dei dati acquisiti in input dai sensori e alle sequenze programmate prende le decisioni sulle azioni da attuare;
- attuatori, rappresentano la parte hardware dell'automazione che va a convertire le decisioni, prese in base ai dati acquisiti in input, in modifiche fisiche del sistema.

In sostanza, con il termine “automazione” generalmente si intende un sistema in grado di misurare una serie di dati in input, elaborarli in modo autonomo e compiere modifiche fisiche al sistema di partenza variandone lo stato. Al significato di “automazione” si contrappone il termine “meccanicizzazione”, con il quale si fa riferimento a tutti quei processi che utilizzano sistemi basati su principi e dispositivi meccanici, atti a ridurre lo sforzo umano nell'esecuzione delle varie operazioni del processo. La principale differenza tra i due sistemi sta nel fatto che quello meccanicizzato richiede l'interazione umana in quanto non è in grado di analizzare i dati e decidere le azioni in autonomia (Anggrahini et al., 2020)⁸⁹.

Queste premesse sono utili per dare una spiegazione della terminologia “Karakuri” e “Kaizen” e contestualizzarla nell'ambito dell'automazione sostenibile. L'origine del termine “Karakuri” risale al 1600, nella cultura giapponese, con riferimento alle tradizionali bambole meccanicizzate dette “*Karakuri Ningyo*” o “*Automata*”; assume diversi significati letterali tra cui meccanismo, trucco o ingegno (Kostrzewski e Nowak, 2022)⁹⁰.

In ambito industriale, con il termine Karakuri si intende un tipo di automazione costituita da meccanismi semplici che generano movimentazioni senza l'utilizzo di energia esterna, bensì soltanto attraverso l'utilizzo di principi fisici quali gravità,

⁸⁹ *Ibidem*

⁹⁰ Kostrzewski M., Nowak W. J., 2022, Karakuri solutions and Industry 4.0, *Handbook of Smart Materials, Technologies and Devices: Application of Industry 4.0*, vol. 4, pp. 69-97, Springer.

elasticità, attrito o magnetismo, escludendo quindi l'impiego di fonti come energia elettrica, pneumatica o idraulica.

Con il termine “Kaizen” si fa riferimento all'approccio giapponese tipico del Lean Management, in cui “Kai” significa miglioramento e “Zen” buono; da qui discende l'approccio Kaizen che indica la propensione al miglioramento continuo e costante, attraverso piccole azioni che consentano di modificare costantemente in positivo lo stato iniziale. Proprio dall'unione di questi due termini trae origine l'approccio cosiddetto “*Karakuri Kaizen*”, che fa riferimento ad una particolare metodologia di implementazione dell'automazione snella, appartenente alla metodologia *Low-Cost Intelligent Automation* (Bertagnolli, 2022)⁹¹. Il Karakuri Kaizen offre soluzioni di automazione semplice e a basso costo, attraverso lo sviluppo di progetti di miglioramento che portano alla creazione di dispositivi meccanici semplici e creativi, particolarmente impiegati nella movimentazione dei materiali e nell'ottimizzazione dei processi in ambito industriale. Questi dispositivi fanno uso esclusivamente di leve, rulli, ingranaggi, camme, molle o manovelle per trasmettere il moto rifiutando, quindi, l'applicazione di fonti di energia esterne ed escludendo, quantomeno nella sua concezione originale, l'applicazione di sensori o altre strumentazioni digitali (Fig. 4.1).



Fig. 4.1 Esempio di sistema modulare automatizzato tramite l'approccio Karakuri Kaizen
(Fonte: Beewatec, 2024)

Si tratta di una soluzione ibrida tra automazione e meccanicizzazione. Infatti, nonostante la mancanza di sensori e analizzatori per elaborare dati e prendere

⁹¹ Bertagnolli F., 2022, *Lean Management Introduction and In-Depth Study of Japanese Management Philosophy*, Springer, Pforzheim.

decisioni in modo autonomo, questi sistemi consentono di automatizzare in maniera significativa i processi attraverso l'uso di meccanismi, dando origine ad un'ampia gamma di soluzioni che generano molteplici benefici in ambito produttivo e logistico (Anggrahini et al, 2020)⁹².

Lo scopo principale dell'approccio Karakuri Kaizen risiede nell'analisi e implementazione nel genba di soluzioni per risolvere problematiche legate alla movimentazione dei materiali, all'aumento della sicurezza e del grado di ergonomia dell'operatore e alla riduzione dell'impatto ambientale in un'ottica di decarbonizzazione dei processi. Questo avviene attraverso un'approfondita conoscenza dei processi che porta allo sviluppo di nuova conoscenza tra le risorse umane. Gli aspetti appena citati rappresentano il cuore di Industria 5.0 e le soluzioni meccaniche sviluppate attraverso l'approccio Karakuri Kaizen offrono nuove opportunità nell'era della Quarta Rivoluzione Industriale. Infatti, anche laddove le soluzioni tecnologiche hanno uno sviluppo esponenziale, le strutture meccaniche e l'automazione semplice continuano a rivestire un ruolo di rilievo nella trasmissione di potenza, offrendo un metodo alternativo all'automazione, più economico, semplice ed efficiente (Özcan, 2022)⁹³.

Al fine di raccogliere la base scientifica per trattare l'approccio Karakuri Kaizen, il presente capitolo, incentrato sui principi, caratteristiche e modalità di funzionamento delle soluzioni Karakuri, e il successivo, che tratta casi reali di implementazione, si basano sulla ricerca bibliografica realizzata attraverso la consultazione del database Google Scholar. Si è verificata in via preliminare la diffusione di pubblicazioni contenenti la parola chiave "Karakuri" a partire dal 1994 fino al 2023, ottenendo una base di 1850 pubblicazioni. La parola chiave è stata ricercata tra tutte le parole presenti in ogni posizione dell'articolo. Le pubblicazioni sono state successivamente suddivise per periodi temporali di 6 anni; quello che emerge è riportato nel grafico in Fig. 4.2, che rappresenta il numero medio di pubblicazioni annue dal 1994 al 2023.

⁹² *Ibidem*

⁹³ Özcan A. G., 2022, Application of Reba and Karakuri Kaizen Techniques to Reduce Ergonomic Risk Levels in a Workplace, *Journal of Engineering Sciences and Design*, vol. 10, n. 4, pp. 1430-1444.

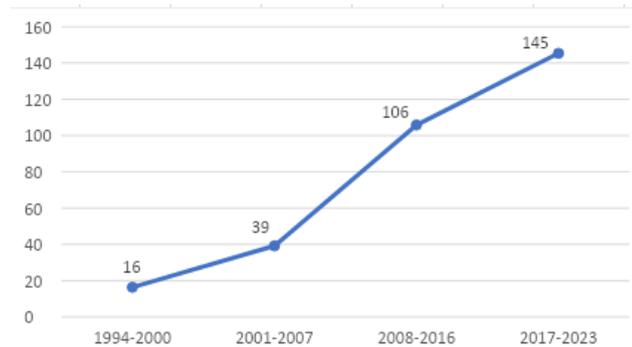


Fig. 4.2 Numero medio di pubblicazioni annue per periodo temporale

Si può notare come il numero di pubblicazioni sia cresciuto a ritmi più veloci a partire dai primi anni 2000, per poi quasi triplicare nel secondo decennio e continuare a crescere negli ultimi sei anni. Considerata la notevole portata di pubblicazioni nel periodo più recente tra il 2017 e il 2023, si è scelto di filtrare ulteriormente l'analisi in questo arco temporale, verificando l'associazione della parola Karakuri con i termini ritenuti particolarmente rilevanti ai fini della trattazione, andando via via a focalizzarsi sulla tematica oggetto della tesi, ovvero l'adozione del Karakuri Kaizen per un'automazione efficiente e sostenibile.



Fig. 4.3 Selezione delle pubblicazioni significative tra il 2017 e il 2023

Rispetto alle 37 pubblicazioni ritenute maggiormente significative, si è fatta un'ulteriore scrematura, a partire dalla lettura dell'abstract e delle conclusioni, sulla base di criteri quali la completezza e il livello di quantificazione dei dati e delle informazioni trattati. Questo ha determinato la selezione di 12 pubblicazioni su cui si sono basate le analisi e considerazioni presenti nell'elaborato; gli estremi bibliografici vengono elencati nella Tab. 4.1. Si consideri la presenza di un articolo risalente al 2014, che è stato inserito in quanto ritenuto rilevante per la provenienza dell'autore dal paese in cui si origina l'approccio Karakuri Kaizen e per la trattazione di un modello teorico sui principi di funzionamento dei meccanismi Karakuri.

Tab. 4.1 Elenco dei riferimenti bibliografici oggetto di analisi

Autori	Anno	Titolo	Fonte	Nazione	Natura
Anggrahini D., Prasetyawan Y., Diartiwi S. I.	2020	Increasing Production Efficiency using Karakuri Principle (A Case Study in Small and Medium Enterprise)	IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering	Indonesia	Caso studio
Bertagnolli F.	2022	Lean Management Introduction and In-Depth Study of Japanese Management Philosophy	Springer	Germania	Libro
Bhanu P. V., Kumar B. S.	2018	Global study and implementation of Karakuri Investigation into the applications of Karakuri and its integration with emerging technologies	Master's thesis in Production Engineering, Chalmers University Of Technology	Svezia	Ricerca
Chang A., Lai P.	2022	Promoting the Application of Lean Automation - Take the Automobile Oil Seal Manufacturing Industry as an Example	IEEE4 th Eurasia Conference on IoT, Communication and Engineering	Taiwan	Caso studio
Chang A., Lai P.	2023	Promoting the Application of Lean Automation - Take the Automobile Oil Seal Manufacturing Industry as an Example	IEEE 5th Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineerin	Taiwan	Caso studio
Katayama H., Sawa K., Hwang R., Ishiwatari N., Hayashi N.	2014	Analysis and Classification of Karakuri Technologies for Reinforcement of their Visibility, Improvement and Transferability: An Attempt for Enhancing Lean Management	Proceedings of PICMET '14: Infrastructure and Service Integration	Giappone	Modello teorico
Kostrzewski M., Nowak W. J.	2022	Karakuri solutions and Industry 4.0	Handbook of Smart Materials, Technologies and Devices: Application of Industry 4.0	Polonia	Ricerca
Muñoz A. A., Florin U., Eriksson Y., Yamamoto Y., Sandström K.	2020	The Karakuri Card Deck: Co-Designing Industrial Iot Conceptual Solutions	Atti della Design Society: DESIGN Conference	Svezia	Modello teorico
Özcan A. G.	2022	Application Of Reba And Karakuri Kaizen Techniques To Reduce Ergonomic Risk Levels In A Workplace	Journal of Engineering Sciences and Design	Turchia	Caso studio
Pogowonto A., Amrina U.,	2020	Reduction of Cycle Time in Vehicle Engine Assembly Line Using Karakuri Kaizen	International Journal of Engineering Research and Advanced Technology (IJERAT)	Indonesia	Caso studio
Prasetyawan Y., Agustin A. A., Anggrahini D	2020	Simple Automation For Pinneapple Processing Combining With Karakuri Design	IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering	Indonesia	Caso studio
Tan H. K., Katayama H., Manickavasagam S.	2023	What is Karakuri Kaizen and Hoe Does it Work?	Proceedings of the 11th International Conference on Production Research- Americas	Inghilterra	Caso studio

Come ulteriore dettaglio ai fini dell'analisi, si evidenzia in Fig. 4.4 la distribuzione delle 12 pubblicazioni selezionate sulla base della provenienza geografica degli autori e della natura dei lavori pubblicati. Quello che emerge è una prevalenza di

autori con riferimento ai paesi asiatici (Indonesia, Taiwan e Giappone) seppur con un contributo da parte di autori europei (in primis Svezia); mentre riguardo alla natura, sono stati selezionati principalmente casi studio che vengono comunque affiancati a ricerche e modelli teorici.

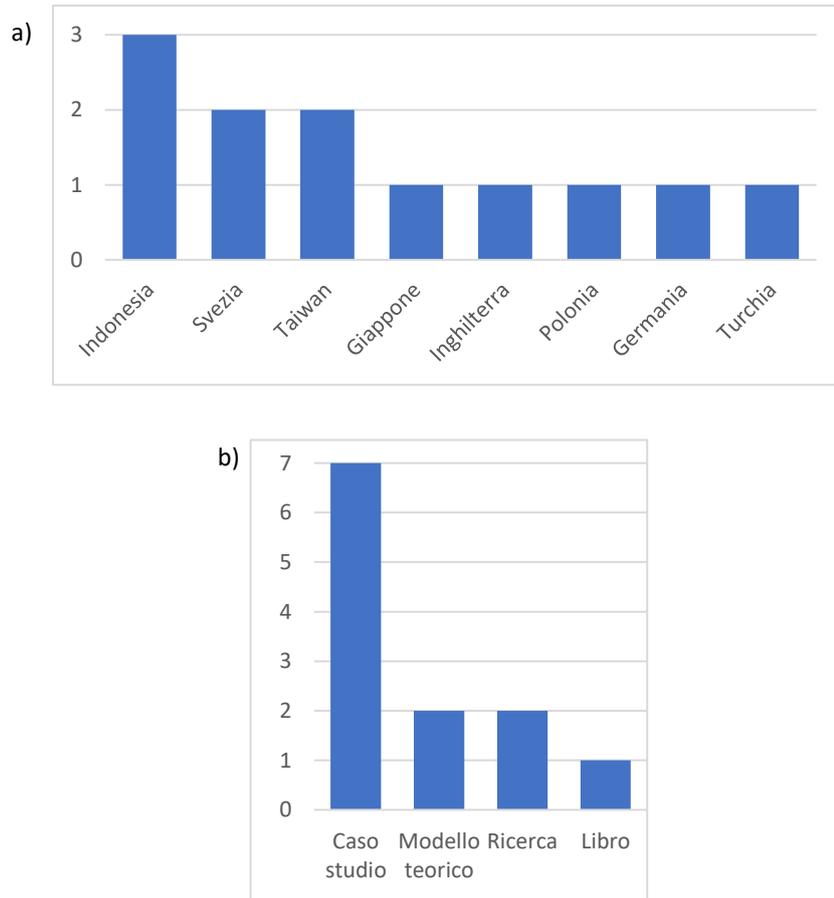


Fig. 4.4 Numero di pubblicazioni raggruppate per nazione (a) e per natura (b)

Da ultima analisi, è importante considerare che l'interesse verso la tematica dell'automazione realizzata mediante l'approccio Karakuri Kaizen è in crescita sia nei paesi asiatici che in quelli europei; tuttavia, i casi di concreta implementazione delle soluzioni Karakuri sono prevalenti nel contesto orientale (6 casi su 7 analizzati). Pertanto, è più frequente lo sviluppo laddove la cultura è vicina ai suoi presupposti originari ma, come si vedrà in seguito, l'attenzione di questo approccio verso le tematiche legate all'ergonomia e alla sostenibilità diventa un'interessante opportunità anche negli altri contesti.

4.2 Cenni storici

Il termine Karakuri ha origini molto antiche, risalenti al XVII secolo in Giappone; nel Grande Dizionario Giapponese “Nihon Kokugo Daijiten” (Kostrzewski e Nowak, 2022)⁹⁴, che rappresenta il più grande dizionario di lingua giapponese pubblicato, la parola deriva dal verbo “*karakuru*” che significa letteralmente “far muovere qualcosa tirando una corda”. Infatti, in quell’epoca, con Karakuri si faceva riferimento alle bambole meccaniche chiamate “*Karakuri Ningyo*” realizzate in legno e metallo, che riproducevano le sembianze umane con abiti e acconciature tradizionali e compivano movimenti complessi attraverso l’utilizzo di semplici meccanismi, al fine di intrattenere le persone. Queste vengono anche definite “Automi” e rappresentano i primissimi antenati e precursori degli attuali Robot.

La nascita dei primi dispositivi Karakuri in Giappone è influenzata dai meccanismi degli orologi occidentali importati nel paese; in particolare, il primo orologio europeo arriva in Giappone nel 1611, come dono in segno di gratitudine del Re di Spagna Filippo III a Tokugawa Ieyasu, governatore dell’ultimo governo feudale giapponese. I meccanismi che caratterizzano gli orologi europei, definiti “*Yodokei*”, si rivelano innovativi per i maestri giapponesi dell’epoca i quali, attraverso la riparazione e il disassemblaggio, acquisiscono un’importante know-how, che verrà poi trasferito nella realizzazione dei dispositivi Karakuri. Queste realizzazioni vengono utilizzate per la maggior parte come fonte di intrattenimento e come bambole da camera per uso personale (Kostrzewski e Nowak, 2022)⁹⁵. I primi dispositivi Karakuri utilizzati in teatro per intrattenere il pubblico, realizzati da Takeda Omi nel 1662, vengono chiamati “*Shibai Karakuri*” ovvero “automa da performance” e rappresentano le prime bambole meccaniche utilizzate nelle rappresentazioni teatrali. Un altro tipo di Karakuri destinato all’intrattenimento pubblico viene definito “*Kairaishi Ningyo*” ovvero “burattinaio”; questo particolare tipo di automa viene messo in esposizione nel Festival di Inuyama, un antico festival risalente al ‘600, in cui si assiste ogni anno alla sfilata di 13 carri allegorici realizzati su tre piani, sulla cima di ognuno dei quali si trova un’installazione di Kairaishi Ningyo. I dispositivi Karakuri domestici per uso personale, invece,

⁹⁴ *Ibidem*

⁹⁵ *Ibidem*

vedono la loro diffusione a partire dall'800, in particolare attraverso gli "automi da camera" detti "*Zashiki Karakuri*", automi di piccola dimensione di circa un metro, come la "bambola da tè", il "giovane arciere" e la "bambola da scrittura"; questi svolgono dei movimenti più complessi nello spazio e, grazie all'utilizzo di corde in combinazione con contrappesi, riescono a creare dei movimenti fluidi e più simili all'essere umano. In particolare, la "bambola da tè" in Fig. 4.5 rappresenta un esempio innovativo all'epoca per la complessità dei movimenti che è in grado di compiere (Bhanu e Kumar, 2018)⁹⁶.



Fig. 4.5 Rappresentazione dell'automa "Bambola da tè" (Fonte: Bhanu e Kumar, 2018)

Questo dispositivo Karakuri si differenzia dagli altri in quanto non riproduce un movimento stazionario, ma si muove in avanti nello spazio con la necessità dell'interazione umana. È stata pensata con lo scopo di servire il tè ad un cliente, in base al meccanismo di seguito descritto: la bambola inizia a muoversi in avanti nel momento in cui un peso viene appoggiato sul vassoio posto nelle sue mani, costituito dalla ciotola piena di tè, e si ferma quando il cliente preleva la tazza; una volta bevuto il tè, il cliente riposiziona la tazza vuota sul vassoio e la bambola si gira, tornando nella posizione di partenza (Kostrzewski e Nowak, 2022)⁹⁷. Questo movimento è realizzato mediante lo spostamento dei piedi lungo un ingranaggio nascosto sotto al vestito che, grazie a una molla di avvolgimento precaricata, genera il movimento frontale; la differenza di peso causata dalla tazza vuota attiva, infine, il movimento di ritorno. È utile mettere in evidenza che uno degli scopi più

⁹⁶ *Ibidem*

⁹⁷ *Ibidem*

importanti di questi meccanismi è quello di generare nell'osservatore stupore e accendere la curiosità nel capirne il funzionamento.

Dai principi di funzionamento applicati agli automi, a partire dal '900, il termine Karakuri viene riferito alla descrizione di particolari meccanismi in ambito industriale in grado di compiere movimenti complessi in modo autonomo, affidandosi solo i principi della fisica elementare come fonte di energia. Dall'applicazione nel campo dell'intrattenimento, i giapponesi hanno tratto ispirazione e declinato questi principi anche nell'ambito dell'industria manifatturiera, realizzando soluzioni Karakuri in grado di aiutare gli operatori nella produzione e movimentazione dei componenti (Kostrzewski e Nowak, 2022)⁹⁸. È proprio in ambito industriale che trae origine il termine “Karakuri Kaizen”, inteso come approccio che mira ad un miglioramento costante dei processi attraverso l'uso di soluzioni Karakuri moderne. Uno dei principi che caratterizza la storia del Karakuri e la cultura giapponese consiste nel trarre ispirazione da soluzioni già realizzate e apprenderne a fondo il know-how, per trasferirlo poi nella realizzazione di miglioramenti in una sfera di applicazione diversa. Per favorire questo terreno fertile di idee e ispirazioni, nel 1994 a Tokyo è stata istituita l'associazione *Japan Plant Maintenance Association* (JIPM), la quale detiene il marchio di Karakuri Kaizen e una volta all'anno organizza una fiera di esposizione di tutte le migliori soluzioni Karakuri del paese (Fig. 4.6).



Fig. 4.6 Esposizione soluzione Karakuri alla fiera istituita dal *Japan Plant Maintenance Association* (Fonte: JIPM, 2023)

Questa fiera ha contribuito in modo significativo alla diffusione delle soluzioni Karakuri, poiché la condivisione di idee e l'apprendimento reciproco rappresentano un mezzo importante per stimolare la nascita di nuove soluzioni.

⁹⁸ *Ibidem*

Nelle aziende giapponesi la pratica del Karakuri Kaizen si è sviluppata in modo strutturale permettendo il miglioramento delle competenze delle persone, attraverso lo sviluppo interno di tali soluzioni per automatizzare i processi. Infatti, l'approccio Karakuri Kaizen in Giappone fa parte della cultura del paese, caratterizzata dalla costante tensione al miglioramento continuo e attenzione alle persone e all'ambiente, stimolando così la diffusione di soluzioni Karakuri all'interno delle aziende (Kostrzewski e Nowak, 2022)⁹⁹. Esiste una netta differenza, invece, in termini di diffusione e frequenza di implementazione di soluzioni Karakuri nelle aziende europee. In Europa, questo approccio è ancora poco diffuso e, quando conosciuto, viene visto come uno strumento da acquistare all'esterno della fabbrica, poiché manca la consapevolezza rispetto alle potenzialità come metodo di automazione, soprattutto in un'ottica di sostenibilità. Ne risulta la nascita di aziende europee di consulenza, come Item o Beewatec, specializzate nel fornire componenti e servizi per la realizzazione di soluzioni logistiche e produttive, tra cui quelle Karakuri. In ogni caso, è in tempi recenti che l'avvento di Industria 4.0 e la recente evoluzione in Industria 5.0 hanno focalizzato maggiore attenzione verso questa metodologia, come testimoniato anche dall'aumento degli studi su tale argomento, dando origine a nuove opportunità per le aziende, in termini di miglioramento sia di efficienza che di sostenibilità.

4.3 Principi e meccanismi di funzionamento delle soluzioni Karakuri

Nell'ambito dell'industria manifatturiera, l'approccio Karakuri Kaizen rappresenta un'interessante opportunità per realizzare soluzioni di automazione, in particolare per quanto riguarda la movimentazione e il trasporto dei materiali. Le soluzioni Karakuri, in linea con i principi LCA, utilizzano sistemi di funzionamento basati su leggi fisiche e meccanismi basilari a basso costo per generare il moto (Bhanu e Kumar, 2018)¹⁰⁰. Per generare in modo semplice la movimentazione, fanno uso di energia naturale come la gravità, meccanismi semplici quali gli ingranaggi e

⁹⁹ *Ibidem*

¹⁰⁰ *Ibidem*

principi fisici di forza elementari come le leve. L'unione di energia e forze dà origine a varie soluzioni di sollevamento e traslazione nel movimentare i materiali. Queste soluzioni sono realizzate principalmente mediante l'utilizzo dei seguenti elementi, che impiegano e combinano tra loro forze ed elementi di base (Tan et al., 2023)¹⁰¹.

Tra le forze di base si consideri:

- forza di attrito, che va a modulare o fermare il movimento del sistema
- forza di gravità, che genera un movimento cinetico andando a variare la posizione del centro di gravità del sistema
- forza elastica, che viene creata dalla reazione del sistema quando deformato da forze esterne
- forza magnetica, che genera una forza di attrazione o repulsione tra sistemi.

Tra gli elementi di base vi sono i seguenti:

- leva, moltiplica la forza meccanica applicata attraverso l'effetto leva modificandone il verso
- ingranaggio, formato da una ruota dentata che ingrana una cremagliera, viene impiegato per trasmettere la coppia del moto controllandone velocità e direzione di movimento; tra questi, risulta rilevante l'uso della croce di Ginevra, che consente di trasformare un moto rotatorio continuo in un moto rotatorio intermittente
- camma, converte il moto da rotatorio a lineare
- molla, accumula e rilascia energia meccanica grazie alla sua natura deformabile; di particolare importanza applicativa risultano le molle di tensione, in cui la deformazione avviene solamente una volta raggiunto un carico minimo, attraverso l'applicazione di un precarico
- puleggia, formata da un elemento girevole, serve a generare una forza di traino mediante l'uso di una corda o un cavo d'acciaio nel verso dell'estremità opposta

¹⁰¹ *Ibidem*

- vite a ricircolo di sfere, usata per trasformare il moto rotatorio in moto traslatorio
- rulliera, consente il movimento di contenitori da un punto a un altro attraverso le piste a rulli, sfruttando le diverse pendenze dei piani di appoggio.

Le forze e gli elementi di base appena elencati vanno a caratterizzare i tre meccanismi principali su cui si basa il funzionamento delle soluzioni Karakuri maggiormente adottate, ovvero il meccanismo ad altalena, il meccanismo di arresto e il meccanismo della puleggia. Questi tre meccanismi vengono spesso utilizzati in combinazione tra loro nell'automazione dei sistemi a basso costo per la movimentazione dei materiali; di seguito si descrivono le loro caratteristiche di funzionamento (Katayama et al., 2014)¹⁰².

Il meccanismo ad altalena rappresentato in Fig. 4.7 viene utilizzato per creare un'automazione nella rotazione dell'oggetto da movimentare, al fine di rendere più semplice l'attività di prelievo. Il suo funzionamento consiste nel posizionare l'oggetto sopra ad un vassoio porta materiale che poggia su di un fulcro; a causa del peso dell'oggetto, il baricentro del sistema si inclina e inizia a ruotare di 90° rispetto alla posizione iniziale, assumendo di conseguenza la nuova posizione di lavoro desiderata.

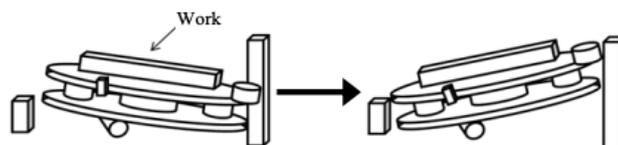


Fig. 4.7 Esempio di meccanismo ad altalena
(Fonte: Katayama et al., 2014)

Per quanto riguarda il meccanismo di arresto, questo viene usato in combinazione con il meccanismo ad altalena appena illustrato, con l'aggiunta di due fermi allo scopo di automatizzare la fermata del movimento iniziale. I due fermi, rappresentati

¹⁰² Katayama H., Sawa K., Hwang R., Ishiwatari N., Hayashi N., 2014, Analysis and Classification of Karakuri Technologies for Reinforcement of their Visibility, Improvement and Transferability: An Attempt for Enhancing Lean Management, *Proceedings of PICMET '14: Infrastructure and Service Integration*, pp. 1895-1906.

in Fig. 4.8 mediante gli “stopper” A e B, intervengono nel seguente modo: una volta che il vassoio porta materiale ha compiuto una rotazione di 90°, il fermo A entra in collisione con il fermo B, generando l’arresto del vassoio in movimento al raggiungimento della posizione finale.

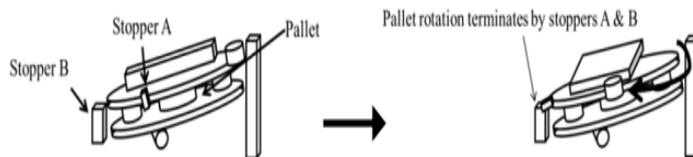


Fig. 4.8 Esempio di meccanismo di arresto
(Fonte: Katayama et al., 2014)

Infine, il meccanismo della puleggia consente di effettuare in modo automatico il sollevamento in verticale dei carichi. Questo si realizza attraverso l’uso di una puleggia, un cavo e due pesi A e B, come mostrato in Fig. 4.9. La condizione necessaria per il funzionamento del meccanismo è che il peso della massa A risulti maggiore del peso della massa B; infatti, una volta rilasciata la massa A, questa si abbassa facendo salire nel mentre la massa B, grazie all’azione della forza peso in direzioni opposte (Katayama et al., 2014)¹⁰³.

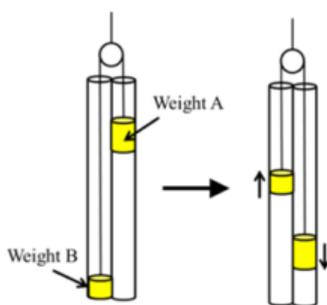


Fig. 4.9 Esempio di meccanismo della puleggia
(Fonte: Katayama et al., 2014)

Tutti e tre i meccanismi appena descritti risultano particolarmente efficaci nella movimentazione dei materiali all’interno della fabbrica, sia in ambito produttivo

¹⁰³ *Ibidem*

che logistico, favorendo tutte quelle attività che richiedono una variazione delle posizioni di lavorazione e facilitando le attività di prelievo.

I meccanismi e principi di funzionamento caratterizzanti le soluzioni di automazione Karakuri vengono messi a terra attraverso una serie di semplici elementi costitutivi, che consentono di realizzare le strutture base dal carattere modulare e modalità creative. In particolare, la maggior parte delle soluzioni Karakuri ricorre a componenti quali sistemi di tubi tondi in acciaio e quadrati in alluminio, giunti in acciaio, binari a rulli, pulegge con cavo e contrappesi. Per ognuno di questi, si descrivono in seguito le principali caratteristiche (Beewatec, 2024)¹⁰⁴. Partendo dai sistemi di tubi utilizzati nella realizzazione dei telai delle strutture Karakuri, quelli tondi in acciaio in Fig. 4.10 hanno un diametro di 28 mm, con una superficie liscia simile all'acciaio inossidabile e una buona resistenza alla corrosione.



Fig. 4.10 Esempio di struttura realizzata con tubi tondi in acciaio $\phi = 28$ mm
(Fonte: Beewatec, 2024)

Quelli con profili quadrati in alluminio in Fig. 4.11, disponibili solitamente nelle configurazioni 28x28 mm, 40x40mm, 45x45 mm, offrono il vantaggio di ridurre il peso complessivo della struttura e, attraverso la presenza di profili di serraggio esterni, consentono il collegamento di elementi aggiuntivi.



Fig. 4.11 Esempio di struttura realizzata con tubi quadrati in alluminio 40x40 mm
(Fonte: Beewatec, 2024)

¹⁰⁴ Beewatec, www.beewatec.com/lean-solutions/karakuri

I telai costituiscono la base di partenza per la realizzazione di soluzioni personalizzate di scaffalature, carrelli porta materiali e postazioni di lavoro; sono economici, veloci da montare e facilmente adattabili in caso di modifiche o revisioni dei sistemi (Beewatec, 2024)¹⁰⁵.

Altri importanti elementi che lavorano in sinergia con i tubi tondi di acciaio e quadrati di alluminio sono i giunti in acciaio, le pulegge con cavo e i contrappesi.

I giunti sono rappresentati in Fig. 4.12; la loro funzione è quella di connettere più tubi tra loro, permettendo di ottenere strutture stabili e robuste. Si differenziano in base alla tipologia di tubi: le giunzioni per tubi tondi lavorano in coppia, garantendo una forza di tenuta superiore a 80 kg sui tubi d'acciaio con $\phi = 28$ mm, grazie alle zone di presa interne; quelle per tubi quadrati lavorano in tenuta nella parte interna e, oltre a consentire la congiunzione di tre tubi, vanno a creare una base nella parte inferiore della struttura dei carrelli da trasporto utile per il fissaggio di ruote per la movimentazione.

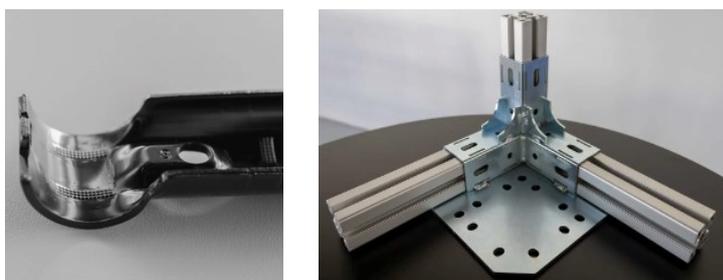


Fig. 4.12 Esempi di giunto in acciaio rispettivamente per tubi tondi e quadrati
(Fonte: Beewatec, 2024)

La Fig. 4.13 rappresenta a sinistra le pulegge con cavo e a destra i contrappesi, che vengono applicati tramite serraggio ai tubi tondi e quadrati, permettendo la realizzazione di soluzioni di sollevamento in grado di sfruttare la differenza peso e il principio della gravità; questo funzionamento avviene attraverso l'utilizzo di cavi d'acciaio o corde e contrappesi (Beewatec, 2024)¹⁰⁶.

¹⁰⁵ *Ibidem*

¹⁰⁶ *Ibidem*



Fig. 4.13 Esempio di puleggia con cavo e sistema di contrappesi
(Fonte: Beewatec, 2024)

Un altro componente fondamentale nelle realizzazioni Karakuri è rappresentato dai binari a rulli in Fig. 4.14; questi vengono posti in opera a coppie formando un trasportatore a rulli senza azionamento, in grado di sfruttare il principio della gravità.



Fig. 4.14 Esempio di binario a rulli con guida laterale
(Fonte: Beewatec, 2024)

I trasportatori a rulli presentano diversi vantaggi che li rendono un elemento essenziale nei sistemi di trasporto aziendali e in particolare nelle soluzioni Karakuri. Innanzitutto, consentono di movimentare in modo efficiente cassette Odette o cartoni, sfruttando la pendenza creata tra il lato di carico e quello di prelievo e rispettando il principio di caricamento FIFO (Beewatec, 2024)¹⁰⁷. Inoltre, mantengono il carico nella linea di scorrimento attraverso le guide laterali che impediscono eventuali sbandamenti e sono in grado di supportare lo spostamento di materiali superiori ai 20 kg tra due postazioni di lavoro. Infine, sono flessibili in

¹⁰⁷ *Ibidem*

quanto, a seconda del loro utilizzo, possono scorrere in una sola direzione, come nelle cremagliere di flusso, o in entrambe le direzioni, come nello spostamento tra postazioni di lavoro successive (Beewatec, 2024)¹⁰⁸.

In linea generale, si può affermare che tutti gli elementi illustrati conferiscono una forte flessibilità e modularità d'impiego nella realizzazione delle soluzioni Karakuri, poiché la semplicità di installazione e il basso costo degli elementi di base consentono di modificare rapidamente la struttura per adeguarla alle mutevoli esigenze del contesto produttivo e logistico.

Prima di proseguire nella trattazione, si ritiene utile riportare a titolo esemplificativo un tipico esempio di soluzione proposta dall'approccio Karakuri Kaizen per meglio comprendere come trovano implementazione in modo sinergico i vari principi fin qui esposti. Il caso mostrato in Fig. 4.15 mostra la realizzazione di una rastrelliera basculante FIFO per la movimentazione di cassette Odette.



Fig. 4.15 Esempio di rastrelliera basculante FIFO realizzata mediante l'approccio Karakuri Kaizen (Fonte: Beewatec, 2024)

La struttura raffigurata ha la funzione di garantire la movimentazione in maniera automatica dei contenitori pieni e la restituzione dei vuoti; è realizzata su due livelli di inclinazione diversi, creati mediante l'utilizzo di tubi tondi d'acciaio che vanno a formare il telaio di sostegno. È composta da rulliere che fanno scorrere i contenitori in maniera fluida; da un sistema a bilancia che, man mano che la cassetta piena viene svuotata, permette l'abbassamento del contenitore verso il livello inferiore; da dei fermi che arrestano il movimento nella posizione di arrivo e, infine,

¹⁰⁸ *Ibidem*

da un meccanismo a puleggia che, una volta ripristinata la quantità nella cassetta, la riporta al livello superiore.

Il principio di funzionamento di questo sistema a rastrelliera si può vedere in maniera schematica nella Fig. 4.16, che rappresenta la transizione dallo stato 0 in cui il sistema è scarico allo stato 1 in cui viene caricato (Katayama et al., 2014)¹⁰⁹.

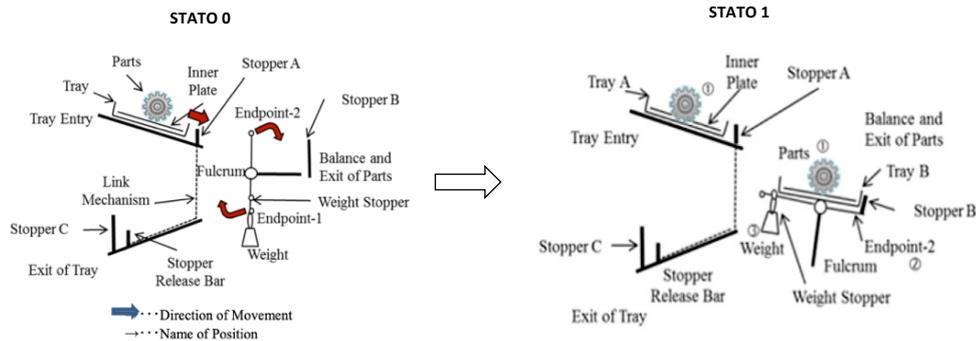


Fig. 4.16 Principio di funzionamento di una rastrelliera basculante FIFO
(Fonte: adattamento da Katayama et al., 2014)

Questo meccanismo è composto essenzialmente da tre parti: zona di carico A (*tray A*), sistema a bilancia B con contrappeso scorrevole (*tray B*) e infine zona di scarico C (*exit of tray*). Nello stato 0 la cassetta Odette piena è stazionaria in zona d'entrata A e, di conseguenza, il sistema a bilancia risulta in equilibrio in quanto scarico; successivamente la cassetta inizia a muoversi lungo la rulliera transitando verso lo stato 1 ed entra nella zona B della bilancia in cui, tramite un contrappeso scorrevole, il piano si inclina man mano che la cassetta viene svuotata e, una volta scarica, le permette di transitare nella zona di scarico C, in cui arresta la sua corsa andando in collisione con il fermo di arresto. Come ultimo passaggio, la cassetta vuota viene riempita e fatta salire automaticamente tramite un meccanismo a puleggia, in modo da riprendere l'intero ciclo. Questa soluzione Karakuri di rastrelliera permette di effettuare il ciclo di carico e scarico delle cassette contenenti pezzi in modo del tutto automatico, basandosi su principi fisici e meccanismi semplici e senza utilizzare energia elettrica.

¹⁰⁹ *Ibidem*

4.4 Linee guida per l'implementazione del Karakuri Kaizen

Il Karakuri Kaizen utilizzato per implementare le soluzioni di automazione a basso costo, quale approccio appartenente alla metodologia del Lean Management, pone particolare enfasi sugli obiettivi legati al miglioramento continuo dei processi, attraverso la riduzione degli sprechi, l'eliminazione del carico eccessivo di lavoro e l'aumento della qualità (Pogowonto e Amrina, 2020)¹¹⁰. Per implementare in modo efficace ed efficiente nei processi produttivi le soluzioni Karakuri, si adotta il metodo scientifico su cui si fonda la Lean, governato dai principi del ciclo di miglioramento continuo PDCA: Plan, Do, Check, Act (Fig. 4.17).

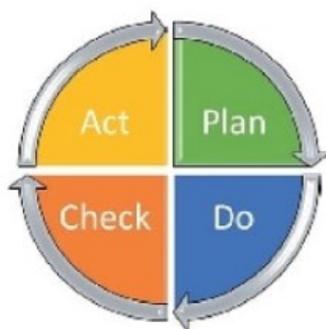


Fig. 4.17 Il ciclo del miglioramento continuo PDCA
(Fonte: Deming, 1950)

Nella fase iniziale di Plan si va ad analizzare la situazione di partenza AS IS del processo, ovvero prima dell'implementazione della soluzione Karakuri, ponendo particolare attenzione agli sprechi di movimentazione e ai fattori ergonomici, al fine di verificare le condizioni di fluidità e produttività del processo stesso. Questa analisi si attua mediante una tecnica di mappatura dei processi (Value Stream Mapping, Swim Lane, Process Activity Mapping), identificando e misurando i vari tipi di attività e i tempi ciclo¹¹¹ delle stesse, tramite indagini e osservazioni che avvengono direttamente nel genba secondo l'approccio Genchi Genbutsu. Le attività vengono suddivise in attività a valore aggiunto e non a valore aggiunto: le

¹¹⁰ Pogowonto A., Amrina U., 2020, Reduction of Cycle Time in Vehicle Engine Assembly Line Using Karakuri Kaizen, *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology (IJERAT)*, vol.6, n. 10, pp. 49-67.

¹¹¹ Tempo ciclo: costituisce il tempo reale in cui gli operatori riescono a completare i propri task.

prime rappresentano il tempo del processo che porta valore per il cliente; le seconde sono costituite da tempi di attesa, ispezione e movimentazione, che non generano valore e possono essere eliminati o diminuiti, oppure altri tempi del processo che, pur non generando valore, sono necessari a causa di vincoli tecnologici. La mappatura delle attività porta alla determinazione del tempo ciclo totale del processo attuale, come somma dei singoli tempi ciclo, e al calcolo dell'indice di flusso, come rapporto tra il tempo a valore e il tempo totale. Questi dati consentono di individuare eventuali colli di bottiglia che superano il Takt Time¹¹² e valutare il livello di efficienza iniziale del processo analizzato (Pogowonto e Amrina, 2020)¹¹³. Successivamente, la fase di Plan richiede che tra le attività non a valore aggiunto si concentri l'analisi sulla ricerca delle cause radice delle inefficienze e sui colli di bottiglia, al fine di comprendere gli ambiti che richiedono di intervenire attuando i miglioramenti necessari per raggiungere la situazione TO BE desiderata. I metodi Lean più comunemente adottati per l'analisi e la risoluzione dei problemi sono il metodo dei "5 Perché" e delle 4M (Man, Machine, Method, Material), che scompongono i vari elementi che causano le inefficienze fino a determinare la causa originaria, e quelli di analisi ergonomica come REBA (Rapid Entire Body Assessment), che permettono un'analisi posturale di tutto il corpo dell'operatore al fine di prevenire rischi associati all'apparato muscoloscheletrico dovuti ad attività ripetitive e repentine.

Una volta individuati gli ambiti del processo da migliorare e identificata la necessità di implementare un'automazione a basso costo mediante soluzioni Karakuri, l'attenzione è focalizzata sulle attività manuali caratterizzate dal fatto di essere ripetitive, brusche e pesanti. Nella fase successiva di Do si passa alla realizzazione della soluzione Karakuri vera e propria, generata utilizzando una metodologia Agile di sviluppo e tenendo conto del layout e dello spazio disponibile (Bhanu e Kumar, 2018)¹¹⁴. Con questa metodologia si prevede come primo passaggio la stesura del concept iniziale del dispositivo Karakuri che conterrà la forma, le dimensioni e le

¹¹² Takt Time: rappresentato un valore teorico dato dal tempo di produzione disponibile diviso per le unità richieste dal mercato; ossia, il ritmo che deve mantenere il processo produttivo per soddisfare la domanda di mercato.

¹¹³ *Ibidem*

¹¹⁴ *Ibidem*

funzionalità richieste; successivamente, si passa in maniera rapida alla realizzazione di un primo prototipo fisico grezzo in quanto, essendo una soluzione di automazione costruita internamente e specificatamente per il singolo processo dell'azienda, andrà testata e migliorata fino all'ottenimento del livello di servizio desiderato. Una volta raggiunto un livello tale da soddisfare le funzionalità richieste, si procede alla realizzazione di dettaglio del design finale del dispositivo Karakuri andandolo a implementare nel processo.

Nella fase di Check, una volta implementata la soluzione Karakuri all'interno del processo, si procede con una nuova analisi e rilevazione dei tempi ciclo, per misurare i benefici ottenuti e l'effettivo raggiungimento della situazione TO BE. Questa fase va a verificare l'effettiva riduzione delle attività a non valore aggiunto, diminuzione del tempo totale di attraversamento del processo e miglioramento dell'indice ergonomico. Qualora si rilevino ancora degli scostamenti rispetto al TO BE desiderato, si rende necessario migliorare ulteriormente la soluzione Karakuri prima di entrare nell'ultima fase ((Bhanu e Kumar, 2018)¹¹⁵.

Nella fase finale di Act, appurati i miglioramenti apportati dalla soluzione Karakuri, si va ad implementarla in modo strutturale nel processo, mantenendo sempre attivo il ciclo del miglioramento continuo attraverso una costante ricerca di feedback da parte degli operatori. Infatti, grazie alla conoscenza approfondita e alla costante analisi critica del processo, il metodo PDCA dell'approccio Lean porta a valutare continuamente nuove opportunità, non solo per migliorare le soluzioni di automazione già implementate, ma anche per identificare in modo consapevole nuove aree che necessitano di una soluzione di automazione.

4.5 L'integrazione delle soluzioni Karakuri con le tecnologie 4.0

Tra le varie soluzioni di automazione, quelle a basso costo di tipo Karakuri presentano notevoli benefici in termini di semplicità d'installazione, riduzione dei costi e impatto ambientale. Tuttavia, queste soluzioni si inseriscono in un contesto

¹¹⁵ *Ibidem*

caratterizzato da uno sviluppo esponenziale di nuove tecnologie di Industria 4.0, dove si considera la connessione ai sistemi ERP e MES aziendali¹¹⁶ uno dei maggiori prerequisiti nella scelta di soluzioni d'automazione. I sistemi di automazione realizzati tramite Karakuri, infatti, si collocano all'interno di un ecosistema aziendale e, per non essere considerati una soluzione a sé stante, devono essere connessi ai sistemi aziendali per garantire un monitoraggio costante dell'efficienza e dello stato di avanzamento in tempo reale (Bhanu e Kumar, 2018)¹¹⁷. Il controllo dell'efficienza è reso possibile grazie all'integrazione nei meccanismi Karakuri di sensori capaci di raccogliere ed elaborare i dati generati dall'automazione. L'uso di sensori, come visto nel capitolo 2, caratterizza le tecnologie digitali e in particolare l'IIoT, abilitando la connessione in rete e la visibilità delle prestazioni dei sistemi e macchinari della fabbrica. Inoltre, il continuo sviluppo di questi dispositivi li ha portati ad assumere dimensioni sempre più piccole e facilmente installabili e l'elevata diffusione ha permesso di ridurre i costi di produzione con un conseguente abbassamento dei prezzi d'acquisto.

È proprio l'IIoT a rappresentare un potenziale campo di sviluppo per far sì che le soluzioni di automazione a basso costo realizzate tramite l'approccio Karakuri Kaizen vengano integrate nel sistema produttivo e logistico, garantendo il monitoraggio e la trasmissione dei dati. A titolo esemplificativo si presentano una serie di sensori potenzialmente integrabili con le soluzioni Karakuri al fine di conmetterle nel sistema IIoT (Kostrzewski e Nowak, 2022)¹¹⁸.

- Sensori iBeacon, rappresentano dei sensori di posizionamento a bassa potenza e basso costo che comunicano tramite piccole antenne attraverso una rete LAN interna, utilizzando la tecnologia di trasmissione *Bluetooth Low Energy* (BLE); permettono così ad altri dispositivi con la stessa tecnologia *beacon* di comunicare e trasmettere dati quando sono nelle vicinanze. I dispositivi integrati con iBeacon sono in grado di trasmettere piccoli pacchetti di dati in modo continuativo, consentendo così una

¹¹⁶ Il sistema ERP è un software che sostiene l'automazione dei vari processi all'interno dell'azienda; sistema MES monitora in tempo reale le operazioni che avvengono nelle linee di produzione.

¹¹⁷ *Ibidem*

¹¹⁸ *Ibidem*

mappatura della posizione a livello locale dell'oggetto con cui sono associati.

- Sensori di vibrazione, sono in grado di misurare lo spostamento, la velocità lineare e l'accelerazione, attraverso il rilevamento delle vibrazioni prodotte da un'oggetto o da un macchinario; sono particolarmente interessanti in ottica di manutenzione predittiva, in quanto lo squilibrio o il disallineamento delle condizioni di lavoro può portare al rilevamento anticipato di anomalie.
- Sensori Bosch MEMS, rappresentano dei piccoli sistemi micro-elettromeccanici in grado di raccogliere ed elaborare in modo continuativo diverse tipologie di dati provenienti dal processo, come ad esempio campo magnetico, pressione, umidità e qualità dell'aria. Grazie alla loro particolare versatilità e flessibilità di utilizzo sono quelli più ampiamente diffusi.

Oltre all'IIoT che rappresenta il driver principale, più recentemente sono state associate alle soluzioni Karakuri anche altre possibili tecnologie digitali aventi rilevanza nella loro implementazione. Queste sono ad esempio (Kostrzewski e Nowak, 2022)¹¹⁹:

- RFID, rappresenta una tecnologia ben consolidata e diffusa, che consente di localizzare e tracciare in modo univoco gli oggetti associati con un trasponder, attraverso l'identificazione con radiofrequenze, e trasmettere i dati acquisiti ai sistemi MES o ERP.
- Sensori Rambus, costituiscono innovativi sensori intelligenti senza lenti di messa a fuoco che, sfruttando la tecnologia rifrattiva ultra-miniaturizzata e il rilevamento termico per la messa fuoco, sono realizzati in misura molto più piccola e meno costosa; le dimensioni notevolmente ridotte e l'economicità li rende particolarmente applicabili a molti oggetti in ambito industriale per consentirne il tracciamento in tempo reale.

Risulta pertanto evidente come lo sviluppo e l'integrazione di sensori nelle soluzioni Karakuri possa dare origine a nuove opportunità nell'implementazione delle automazioni a basso costo, andando ad ampliare il campo di applicazione. Pur

¹¹⁹ *Ibidem*

essendo la notevole semplicità un potenziale di queste soluzioni, alcune aziende tendono a diffidare, preferendo le automazioni più complesse diffuse con Industria 4.0 (Anggrahini et al., 2020)¹²⁰. I vantaggi e gli svantaggi legati alle soluzioni Karakuri meritano, a questo punto, di essere trattati in dettaglio, considerata la loro importanza nel guidare le aziende nelle scelte di adozione dell'automazione.

4.6 Vantaggi e svantaggi dell'approccio Karakuri Kaizen

Il Karakuri Kaizen, alla luce di quanto finora discusso, rappresenta un principio all'interno dell'approccio Lean che si propone come alternativa all'automazione tradizionale, al fine di portare nel contesto produttivo e logistico soluzioni che sfruttano meccanismi ingegnosi, con numerosi vantaggi in termini di efficienza produttiva, sostenibilità ed engagement, in linea con le evoluzioni di Industria 5.0. Iniziando ad analizzare l'ambito dell'efficienza produttiva, gli effetti positivi si riscontrano in quanto le soluzioni Karakuri sono in grado di impattare in maniera significativa le tre macro-categorie di sprechi Muda, Mura e Muri, illustrate nel capitolo 1, le quali influenzano il terzo principio fondamentale del Lean Management rappresentato dal flusso continuo (Bhanu e Kumar, 2018)¹²¹. Partendo dai Muda ovvero i 7 sprechi della Lean, le soluzioni Karakuri consentono di migliorare la gestione dei materiali attraverso la realizzazione di rack di flusso ed elementi di scorrimento, che sfruttano la forza di gravità e meccanismi semplici come il principio della leva e i rulli. Ne risulta un'ottimizzazione degli spostamenti dei materiali, che scorrono in maniera più fluida, e quindi una riduzione degli sprechi di movimentazione e trasporto eccessivo di materiali e oggetti pesanti. Inoltre, questo porta con sé un sensibile miglioramento dei tempi ciclo dei task critici, con una conseguente riduzione dei tempi di attesa del materiale nelle varie fasi del processo. Passando ai Mura ossia le irregolarità nella produzione, gli elementi costitutivi con cui vengono progettate e realizzate le soluzioni Karakuri, quali tubi e rulliere, conferiscono un forte carattere modulare che le rende particolarmente flessibili. Questa flessibilità determina a sua volta una notevole

¹²⁰ *Ibidem*

¹²¹ *Ibidem*

semplicità di implementazione e modifica, che può essere gestita direttamente da un operatore o dal team coinvolto nel progetto, senza richiedere l'intervento di manodopera specializzata, come si renderebbe invece necessario in caso di introduzione di una nuova funzionalità all'interno di un software con l'intervento di un programmatore (Kostrzewski e Nowak, 2022)¹²². Tutto ciò consente ai dispositivi Karakuri di adattarsi rapidamente alle fluttuazioni della domanda, rispondendo con un aumento o diminuzione delle dimensioni e della capacità di movimentazione delle strutture stesse. Infine, considerando i Muri, che rappresentano il sovraccarico delle risorse, l'ottimizzazione dei processi di movimentazione dei materiali grazie alle soluzioni Karakuri porta a eliminare le attività che non generano valore aggiunto, liberando del tempo e quindi diminuendo il carico di lavoro degli operatori. In sostanza, l'adozione di questi semplici meccanismi incide in maniera particolare sull'aumento di efficienza produttiva e quindi di redditività, riducendo o eliminando le perdite di tempo dovute alle movimentazioni eccessive.

L'approccio Karakuri Kaizen, oltre ad apportare benefici in termini di efficienza produttiva, rappresenta un tipo di automazione che rispecchia i principi della sostenibilità, rientrando con le sue caratteristiche all'interno dei tre pilastri della sostenibilità economica, sociale e ambientale. Per quanto riguarda la sostenibilità economica, le soluzioni Karakuri rappresentano un'importante opportunità per ampliare i modelli di business, specialmente per le PMI, poiché abbassa le barriere d'accesso all'automazione (JIPM, 2024)¹²³. Questo è dovuto al fatto che i costi d'investimento iniziali e di gestione complessivi durante tutto il ciclo di vita sono inferiori rispetto all'alta automazione, in quanto sono principalmente soluzioni realizzate all'interno dell'azienda con il contributo degli operatori, l'utilizzo di materiali semplici e l'impiego di energia ridotto al minimo. Infatti, la semplicità di manutenzione e riparazione consente di evitare l'intervento di manodopera specializzata, abbattendo i costi di manutenzione; l'utilizzo di fonti di energia naturale quali gravità ed elasticità non richiede la presenza di motori elettrici, azzerando i costi relativi all'energia elettrica, che invece diventano una componente

¹²² *Ibidem*

¹²³ JIPM, www.jipm-event.com/karakuri

impattante quando si inserisce l'alta automazione in ambito logistico e produttivo (Kostrzewski e Nowak, 2022)¹²⁴. L'approccio Karakuri Kaizen vede una forte declinazione anche nei confronti della sostenibilità sociale, dal momento in cui la fase di progettazione pone particolare attenzione nel realizzare soluzioni che vadano a migliorare sensibilmente il benessere degli operatori e gli aspetti ergonomici del processo, creando un ambiente di lavoro più confortevole e sicuro. Questo si traduce nell'implementazione di sistemi di automazione a basso costo che supportino l'operatore in tutte le attività ripetitive, pesanti e che comportano movimenti bruschi, come quelle di carico e scarico o sollevamento e spostamento di oggetti pesanti, in modo da preservare la forza lavorativa e ridurre nel lungo termine i rischi associati a disturbi muscoloscheletrici. Oltre al beneficio diretto sul piano operativo, questi sistemi consentono di far fronte a esigenze dovute all'invecchiamento della forza lavoro e di estendere alcune lavorazioni anche a operatrici donne, sfruttando l'assistenza dell'automazione, creando così un ambiente lavorativo più inclusivo e sensibile alle diversità. Infine, si integrano adeguatamente nelle politiche sindacali, venendo percepite non come soluzioni di automazione che mirano a sostituire l'operatore bensì che richiedono l'interazione e la collaborazione sia nella fase di progettazione e implementazione che nel ciclo del miglioramento continuo (JIPM, 2024)¹²⁵. Infine, le automazioni a basso costo realizzate con l'approccio Karakuri hanno un impatto determinante anche nei confronti della sostenibilità ambientale che, specialmente negli ultimi anni a causa dei sempre più evidenti cambiamenti climatici e con l'evoluzione di Industria 5.0, è diventata un elemento a cui le aziende non possono più rimanere indifferenti. Infatti, attraverso l'utilizzo di fonti di energia generate dalla forza di gravità, elastica e magnetica, le soluzioni Karakuri evitano l'utilizzo di energia elettrica che viceversa caratterizza le più tradizionali tipologie di dispositivi nelle movimentazioni logistiche e produttive, quali carelli elevatori, gru impilatrici high-bay e sistemi di stoccaggio automatizzati, dove l'energia elettrica rappresenta la fonte primaria. Tutto ciò si traduce in una diminuzione delle emissioni di carbonio, andando a ridurre l'impatto ambientale e a generare un importante risparmio

¹²⁴ *Ibidem*

¹²⁵ *Ibidem*

energetico da parte delle aziende che le adottano. Si tratta di una netta differenza delle automazioni a basso costo rispetto a quelle tradizionali, che ne determina un interessante vantaggio competitivo specialmente nel processo di decarbonizzazione a cui le aziende sono tenute a rispondere sempre di più nei prossimi anni, impattando oltretutto i bilanci di sostenibilità e il grado di responsabilità sociale d'impresa.

I vantaggi determinati dall'approccio Karakuri Kaizen non si limitano all'ambito dell'efficienza produttiva e della sostenibilità, essendo di particolare rilievo anche l'influenza sul grado di coinvolgimento delle risorse umane all'interno dell'azienda. Infatti, alla base delle soluzioni Karakuri risiede il principio della realizzazione interna, che avviene attraverso l'identificazione direttamente nel genba di problematiche da risolvere e migliorare tramite l'automazione. Per fare ciò, è necessario che gli operatori o i team dedicati allo sviluppo di tali soluzioni comprendano appieno il funzionamento dei processi e i principi del metodo Karakuri, sviluppando così una capacità di pensiero critico e consapevolezza volta al miglioramento continuo, che stimola la nascita di nuove idee creative attraverso la risoluzione interna delle problematiche riscontrate. In questo modo, gli sforzi sostenuti e le difficoltà affrontate da parte di tutto il team generano un senso di realizzazione e motivazione poiché le persone, oltre a vedere risolta e migliorata la problematica attraverso una soluzione generata direttamente nel genba, si sentono pienamente coinvolte nel processo di miglioramento (JIPM, 2024)¹²⁶.

Questi tre ambiti su cui produce vantaggi l'approccio Karakuri Kaizen, efficienza produttiva, sostenibilità e coinvolgimento delle persone, sono tra loro interconnessi secondo una prospettiva ciclica come rappresentato in Fig. 4.18. Il modello, che risulta dall'analisi dei benefici appena introdotta, intende esprimere come l'implementazione di una soluzione Karakuri sia in grado di migliorare contemporaneamente più aspetti dell'organizzazione aziendale, trainata dai principi del miglioramento continuo. L'adozione della soluzione Karakuri non è mai fine a sé stessa, ma diventa parte costitutiva dei processi, alimenta il know-how e genera una cultura del miglioramento in ottica Lean.

¹²⁶ *Ibidem*

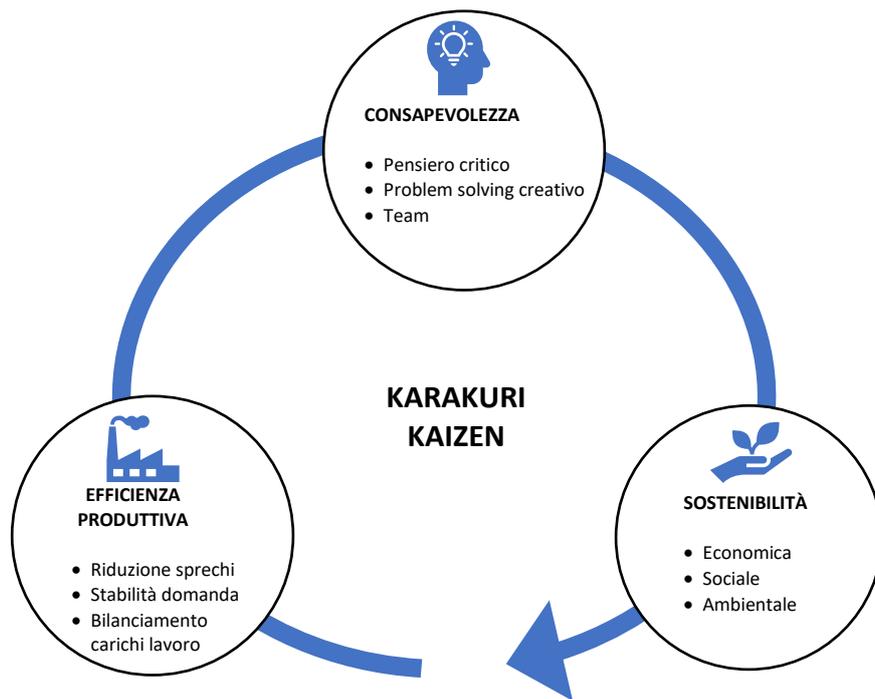


Fig. 4.18 I benefici dell'approccio Karakuri Kaizen: un modello ciclico

Nonostante i numerosi vantaggi appena illustrati conseguenti all'implementazione di soluzioni di automazione attraverso l'approccio Karakuri Kaizen, è necessario tenere conto anche degli aspetti che vanno a costituire elementi di svantaggio specialmente nel contesto aziendale europeo. La semplicità che contraddistingue il metodo Karakuri è legata nella sostanza a una cultura aziendale orientata ai principi fondamentali del sistema Lean, ovvero il miglioramento continuo e il coinvolgimento delle persone. Si può constatare che questi fanno parte della cultura asiatica in modo strutturale, mentre in Europa ad oggi questa cultura non è altrettanto diffusa, rendendo di conseguenza complesso cogliere appieno i vantaggi derivanti dallo sviluppo interno di tali soluzioni. In mancanza dei prerequisiti interni necessari, le aziende europee possono essere tentate dall'acquisto esterno delle soluzioni Karakuri da società di consulenza nate in risposta a queste esigenze; tuttavia la mancanza di consapevolezza fa sì che l'implementazione di queste non vada a buon fine e, conseguentemente, la metodologia venga presto abbandonata

(Bhanu e Kumar, 2018)¹²⁷. Inoltre, ancor prima di tentarne l'adozione, le aziende europee possono dimostrare scetticismo verso tali soluzioni, per l'elevato grado di semplicità e il basso costo, vedendole come soluzioni di ripiego più economiche e non apprezzando il carattere snello e intelligente per cui sono state concepite. Questo comporta la preferenza verso soluzioni altamente automatizzate attraverso le tecnologie diffuse da Industria 4.0, qualora la disponibilità economica lo consenta, oppure un accantonamento delle soluzioni di automazione se il capitale disponibile non è sufficiente per far fronte all'investimento, preferendo rimanere nell'ambito delle metodologie manuali non altrettanto efficienti in termini di sprechi ed ergonomia (Kostrzewski e Nowak, 2022)¹²⁸. Un altro limite da tenere in considerazione nell'adozione dell'approccio Karakuri Kaizen per le aziende europee riguarda la struttura organizzativa. Queste soluzioni richiedono di essere originate da decisioni prese direttamente nel genba che, per essere approvate e implementate in modo veloce, rendono necessaria una struttura organizzativa orizzontale per processi tipica dell'approccio Lean. Tuttavia, quella che ancora prevale in Europa nelle PMI è una struttura tipicamente verticale organizzata per funzioni, in cui viene meno la velocità di analisi e risoluzione dei problemi, aumentando il tempo di sviluppo e il rischio di accantonamento del progetto (JIPM, 2024)¹²⁹.

Alla luce del quadro discusso in quest'ultimo paragrafo, risulta evidente come le scelte di implementare un'automazione a basso costo, alla pari di quelle relative all'adozione di qualsiasi altra tecnologia digitale, vadano ponderate in maniera attenta e completa, e costruite su misura sulla base delle specifiche caratteristiche del contesto organizzativo dell'azienda. Questo richiede di osservare le linee guida dettate dal metodo scientifico, con particolare attenzione alla fase di analisi e pianificazione, prima di passare alla fase di implementazione, come verrà esemplificato nei casi di implementazione trattati nell'ultimo capitolo.

¹²⁷ *Ibidem*

¹²⁸ *Ibidem*

¹²⁹ *Ibidem*

CAPITOLO 5

Applicazioni reali di soluzioni Karakuri in ambito industriale

Questo capitolo conclusivo intende presentare dei casi reali di applicazioni di soluzioni Karakuri in diversi contesti industriali. Dopo aver ricondotto i casi al modello ciclico, vengono approfonditi nel dettaglio; nell'ultimo paragrafo si dà rilevanza alle oggettività emerse con alcune considerazioni di carattere sia qualitativo che quantitativo.

5.1 Introduzione ai casi studio

Il modello ciclico raffigurante i benefici dell'approccio Karakuri Kaizen è stato presentato nel capitolo precedente come interconnessione tra gli ambiti dell'efficienza produttiva, della sostenibilità e della consapevolezza del team per sostenere il miglioramento continuo in azienda. Questo modello racchiude gli elementi fondamentali su cui ha impatto l'adozione delle soluzioni Karakuri nel contesto industriale. In questo capitolo ci si propone di trovare un riscontro concreto delle soluzioni Karakuri nel contesto industriale per verificare come queste supportano il modello ciclico nelle varie aree che lo compongono.

Rispetto ai 37 riferimenti bibliografici individuati nel capitolo precedente, contenenti le quattro parole chiave rilevanti per la tematica oggetto dell'elaborato (Karakuri + Kaizen + Industry 4.0 + Sustainability), si evidenzia innanzitutto una scarsa presenza di casi applicativi reali che limita il perimetro dell'analisi. I 5 casi studio emersi come significativi e quindi rientrati nella Tab. 4.1 - Elenco dei riferimenti bibliografici oggetto di analisi - soddisfano i seguenti requisiti: accessibilità del documento, lingua inglese e descrizione dettagliata della soluzione Karakuri implementata. Per questo motivo, all'interno della trattazione del presente capitolo, si è stabilito di approfondire nel dettaglio l'analisi condotta dagli autori e

i meccanismi di funzionamento delle soluzioni Karakuri al fine di sostenere con dati reali l'impatto nei tre ambiti del modello ciclico.

Tra quelli selezionati, 4 casi si riferiscono ad aziende asiatiche, di cui 3 nel settore automotive e 1 nell'industria alimentare; mentre l'ultimo riguarda un'azienda europea operante nell'industria del bianco. Questi 5 casi studio sono contestualizzati in Fig. 5.1.

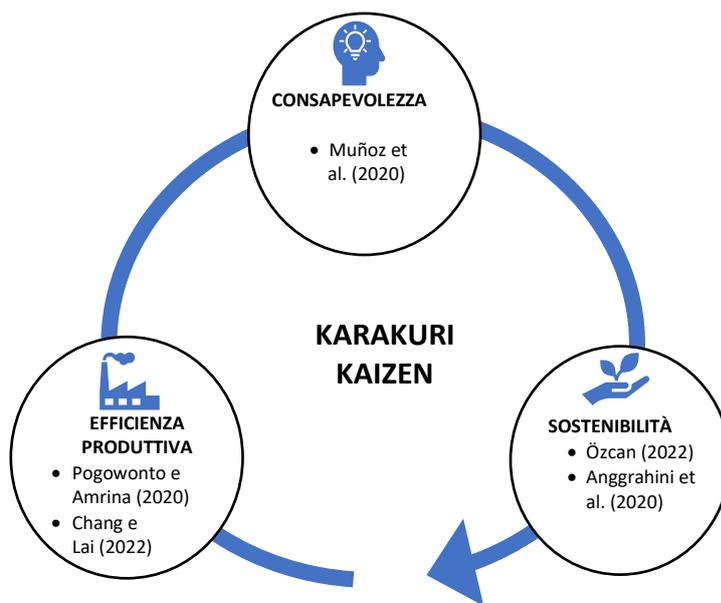


Fig. 5.1 I 5 casi studio oggetto di analisi all'interno del modello ciclico

Nei primi due casi di Pogowonto e Amrina (2020) e Chang e Lai (2022), la scelta di implementare delle soluzioni Karakuri è orientata maggiormente all'ottenimento di benefici in termini di efficienza produttiva, in particolare di ottimizzazione dei flussi dei materiali in linea nel primo caso e della logistica interna nel secondo caso. I due casi successivi di Özcan (2022) e Anggrahini et al. (2020) pongono prevalentemente l'attenzione sull'implementazione di dispositivi Karakuri per migliorare l'ergonomia, il grado di sicurezza della postazione di lavoro e l'efficientamento energetico. Infine, con l'ultimo caso di Muñoz et al. (2020), di carattere trasversale, si sposta l'attenzione principalmente sul tema della consapevolezza dei processi e del coinvolgimento degli operatori nel miglioramento continuo.

Nello sviluppo dei 5 casi si presenta una descrizione di dettaglio della situazione attuale, da cui emergono una serie di sprechi di movimentazione, accumulo di

scorte ed energetici. Dall'analisi degli sprechi si possono apprezzare le motivazioni che spingono all'adozione di una soluzione di automazione Karakuri e si discute la metodologia adottata per metterla a terra. Dal confronto tra la situazione attuale e la situazione ottimizzata si rilevano e quantificano, ove possibile, i benefici ottenuti discutendo anche di eventuali limitazioni che necessitano di approfondire il caso con ulteriori analisi.

5.2 Dispositivo Karakuri per la gestione delle movimentazioni in una linea produttiva

Nel primo caso studio si considera un'azienda indonesiana del settore automotive, produttrice di blocchi motore per automobili, in cui l'area produttiva è composta principalmente da due reparti: uno dedicato alle lavorazioni meccaniche e l'altro all'assemblaggio. Sulla spinta di una forte crescita del mercato delle automobili negli ultimi anni, al reparto di assemblaggio viene richiesto di ottimizzare costantemente le prestazioni produttive, contenendo i costi delle lavorazioni al fine di mantenere la competitività nel mercato. L'azienda in esame applica già in modo consolidato i metodi produttivi Lean, in particolare le pratiche JIT, ponendo particolare attenzione alla misurazione dei KPI rappresentati dal tempo ciclo e dal Takt Time. Per rispondere all'esigenza di migliorare gli indicatori chiave, dopo una serie di valutazioni interne, l'azienda sceglie di ricorrere all'approccio Karakuri Kaizen (Pogowonto e Amrina, 2020)¹³⁰.

La linea di montaggio dei motori è composta da 17 stazioni di assemblaggio, così suddivise: la linea principale, che lavora le parti esterne e accessorie del motore ed è formata da 7 stazioni; la linea secondaria formata da 10 stazioni, che lavora le parti principali del motore quali blocco cilindri (CB) nelle prime 5 stazioni, testata (H) nelle successive 3 stazioni, infine montaggio pistoni (PT) nelle ultime 2. Lo studio si concentra in particolare sull'analisi della linea di assemblaggio secondaria essendo quella maggiormente critica dal punto di vista delle performance. Il punto

¹³⁰ Pogowonto A., Amrina U., 2020, Reduction of Cycle Time in Vehicle Engine Assembly Line Using Karakuri Kaizen, *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology (IJERAT)*, vol.6, n. 10, pp. 49-67.

di partenza per il rilevamento dello stato attuale è la costruzione dello Yamazumi Chart ¹³¹ riportato in Fig. 5.2, che rappresenta i tempi delle varie fasi del processo e prende in considerazione il Takt Time globale alla quale la linea di assemblaggio risponde, quantificato in 180 secondi.

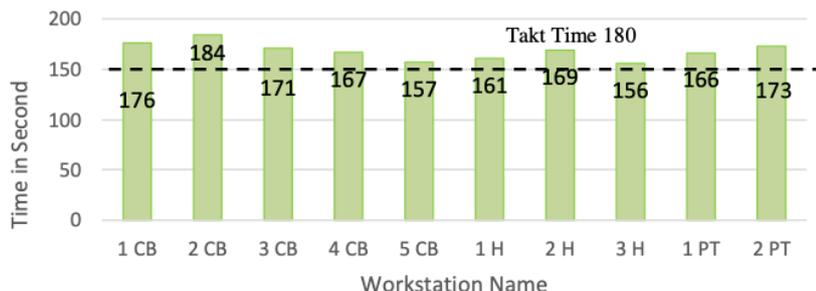


Fig. 5.2 Yamazumi Chart della line di assemblaggio secondaria con Takt Time = 180 s
(Fonte: Pogowonto e Amrina, 2020)

Come si può notare dal grafico, la seconda stazione di assemblaggio (2 CB), dedicata alla preparazione dei cuscinetti superiori e inferiori e alloggiamento dell'albero motore, risulta avere un tempo ciclo pari a 184 secondi, quindi maggiore rispetto al Takt Time. Il tempo ciclo superiore al Takt Time rappresenta un fattore di criticità nella linea di assemblaggio, in quanto crea attese nelle stazioni successive e scorte in quelle precedenti, rendendo meno fluido ed efficiente il processo. Allo stato attuale, come si vede in Fig. 5.3, nella stazione 2 CB il basamento del motore viene posto in entrata alla stazione ruotato di 180° rispetto alla normale posizione di lavoro, attraverso un dispositivo di ribaltamento, e fatto scorrere manualmente su una rulliera da parte dell'operatore, dall'area di preparazione e inserimento dei cuscinetti superiori (*bearing upper area*) all'area di alloggiamento dell'albero a gomiti (*crankshaft area*); infine, una volta assemblato, l'albero viene spostato nella stazione successiva (Pogowonto e Amrina, 2020)¹³².

¹³¹ Yamazumi Chart: strumento visuale di analisi dei processi, costituito da un grafico a barre che riporta la distribuzione del carico di lavoro tra le diverse stazioni che compongono il processo; per ogni stazione viene riportato il tempo ciclo e viene preso come benchmark il Takt Time.

¹³² *Ibidem*

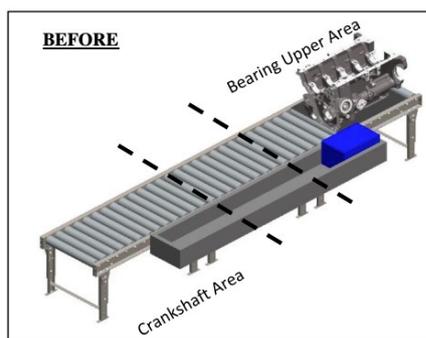


Fig. 5.3 Sequenza di assemblaggio nella stazione 2 CB allo stato attuale
(Fonte: Pogowonto e Amrina, 2020)

Oltre a dover spingere il basamento motore, all'operatore spetta il compito di spostare tra le due aree la maschera utilizzata per preparare i cuscinetti superiori e inferiori; infatti, una volta montati i cuscinetti inferiori e alloggiato l'albero motore, l'operatore deve riportare la maschera nella posizione iniziale, facendola scorrere manualmente sul cuscinetto guida, per preparare i cuscinetti necessari al basamento successivo.

Dopo aver identificato le fasi del processo, si vanno a mappare le attività svolte all'interno della stazione 2 CB, al fine di determinare le cause alla radice delle inefficienze. Per questa finalità, si adotta il metodo di mappatura *Process Activity Mapping* (PAM) che porta alla misurazione di quantità e tempi delle attività a valore e delle attività non a valore effettuate allo stato attuale nella stazione 2 CB, come riportato in Tab. 5.1 (Pogowonto e Amrina, 2020)¹³³.

Tab. 5.1 Risultati quantitativi dell'attività di mappatura PAM (Fonte: Pogowonto e Amrina, 2020)

Total Cycle Time	184
Number of VA	16 (115 seconds)
Number of NNVA	19 (52 seconds)
Number of NVA	7 (17 seconds)
Total <i>Process Time</i>	144 seconds
Total <i>Inspection Time</i>	23 seconds
Total <i>Moving Time</i>	17 seconds

Dall'attività di mappatura all'interno della stazione 2 CB vengono rilevate 42 sotto attività che determinano un tempo ciclo totale di 184 secondi. Tra queste sotto attività, si possono distinguere: 16 attività a valore (VA) come installazione degli

¹³³ *Ibidem*

ugelli, inserimento dei cuscinetti nell'albero a gomiti e lubrificazione dell'alloggiamento dell'albero motore, per un tempo totale di 115 secondi; 7 attività non a valore (NVA) quali spinta del blocco cilindri nell'area montaggio dell'albero motore e spostamento in avanti e indietro della maschera per la preparazione dei cuscinetti, per un tempo totale di 17 secondi; infine, 19 attività non a valore non eliminabili (NNVA) come posizionamento a 180° del basamento motore e controlli visivi delle dimensioni di cuscinetti e albero motore, per un tempo totale di 52 secondi. Da quest'ultima tipologia di attività, viene scorporato il tempo di ispezione di 23 secondi al fine di determinare il *Process Time* che ammonta a 144 secondi; mentre le attività non a valore legate alle movimentazioni concorrono per un tempo di 17 secondi. Questo porta al calcolo dell'indice di flusso iniziale (IF) come rapporto tra *Process Time* e *Total Cycle Time* (Pogowonto e Amrina, 2020)¹³⁴:

$$IF_{as\ is} = \frac{144}{144 + 23 + 17} = \frac{144}{184} = 78\%$$

Secondo quanto emerso dall'analisi quantitativa dello stato attuale, si deduce che agendo solamente sulle sette attività non a valore, ovvero riducendo le attività di movimentazione non necessarie, è possibile determinare una diminuzione del tempo ciclo totale, facendolo rientrare entro il Takt Time. Per questo motivo, l'azienda sceglie di concentrarsi sull'analisi delle cause radice che portano alle inefficienze nella movimentazione del basamento motore, adottando lo strumento di analisi delle 4M o Diagramma di Fishbone, rappresentato in Fig. 5.4.

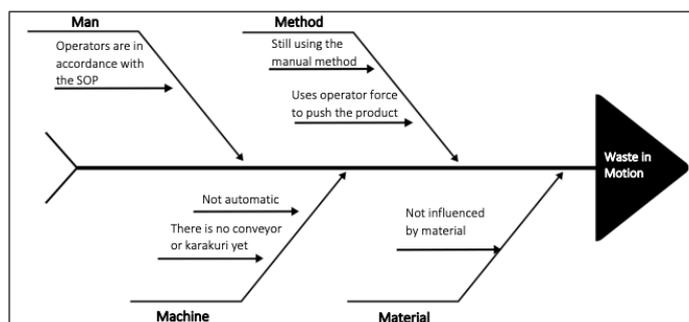


Fig. 5.4 Diagramma di Fishbone (Fonte: Pogowonto e Amrina, 2020)

¹³⁴ *Ibidem*

L'uso di questo metodo guida il confronto e la discussione del team a cui è affidato il progetto di miglioramento, che si interroga sull'origine delle cause che generano gli sprechi di movimentazione, distinguendo qualora queste derivino da inefficienze nei metodi, nei materiali, nelle macchine o negli operatori. Dal confronto emerge come i materiali e le procedure operative standard a cui si attengono gli operatori non abbiano correlazione con gli sprechi oggetto di analisi.

Per quanto riguarda le metodologie lavorative e le macchine, si nota che gli operatori impiegano metodi manuali per movimentare il basamento e la maschera di supporto, spingendoli a mano sulla rulliera. Il gruppo di lavoro, dunque, focalizza la discussione sulla mancanza di automazione e come questa vada a incidere sul risultato finale del tempo ciclo della stazione 2 CB, con particolare riferimento, all'attività ripetitiva di spostamento della maschera utilizzata per la preparazione dei cuscinetti, dalla zona di preparazione e installazione dei cuscinetti superiori a quella di alloggiamento dell'albero a gomiti e installazione dei cuscinetti inferiori e viceversa, costringendo l'operatore a uno spreco di movimentazione attraverso un'attività di spinta manuale (Pogowonto e Amrina, 2020)¹³⁵.

Tutto questo ragionamento porta alla progettazione di una soluzione di automazione utilizzando l'approccio Karakuri Kaizen per automatizzare il ritorno della maschera dei cuscinetti. Per realizzare il meccanismo di ritorno della maschera si sfruttano i principi caratteristici delle soluzioni Karakuri, quali la forza peso, il meccanismo ad altalena, il sistema con contrappeso e molle, senza ricorrere quindi all'uso di energia elettrica esterna.

Questo meccanismo viene realizzato tramite l'aggiunta di semplici elementi al cuscinetto guida in cui scorre la maschera e al piano di scorrimento della rulliera: per quanto riguarda il cuscinetto guida della maschera, si aggiunge nella parte inferiore centrale un perno (*teeter-totter pedestal*) con funzione di fulcro che attiva il meccanismo ad altalena, all'estremità destra un contrappeso (*ballast*) di 10 kg che controbilancia la guida, il cui peso risulta essere di 3 kg, e in entrambe le estremità dei fermi di arresto (*stopper*) per evitare un'eccessiva inclinazione; con riferimento al piano di scorrimento della rulliera, si crea una piattaforma a molla (*trigger*) nell'area di alloggiamento dell'albero a gomiti, più alta di 1 cm rispetto al piano di

¹³⁵ *Ibidem*

scorrimento e collegata mediante un perno rigido al cuscinetto guida della maschera. Le implementazioni appena descritte sono mostrate in Fig. 5.5.

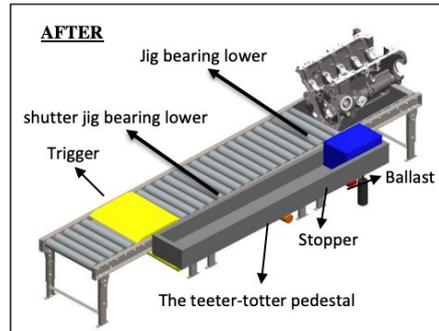


Fig. 5.5 Risultato dell'applicazione della soluzione Karakuri
(Fonte: Pogowonto e Amrina, 2020)

Il meccanismo di funzionamento della soluzione Karakuri è rappresentato nelle due figure successive. Come mostra la Fig. 5.6, nella posizione iniziale in entrata nella stazione 2 CB il basamento del motore staziona nella zona di alloggiamento dei cuscinetti superiori (*bearing upper area*) e il contrappeso di 10 kg posto all'estremità destra scarica il suo peso nella parte inferiore creando un'inclinazione della guida di 1°. In questo modo, grazie al meccanismo ad altalena la guida risulta inclinata verso il lato destro, alzandosi e non caricando la piattaforma di appoggio nell'area di alloggiamento dell'albero motore a sinistra, che risulterà scarica come mostrato in Fig. 5.6.

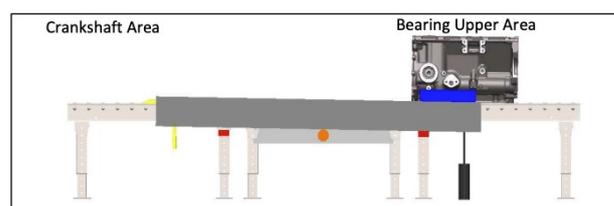


Fig. 5.6 Prima parte del movimento dell'applicazione Karakuri
(Fonte: Pogowonto e Amrina, 2020)

Successivamente, il basamento del motore viene fatto scorrere manualmente in avanti dall'operatore verso la zona di alloggiamento dell'albero a gomiti (*crankshaft area*) fino al raggiungimento della piattaforma di appoggio. Sfruttando il peso di 50 kg del basamento, si attiva il meccanismo a molla e la piattaforma scende verso il basso; si genera un'inclinazione di 2° verso sinistra che solleva il

contrappeso e fa scendere la guida di scorrimento della maschera, facendola scorrere automaticamente nell'area di alloggiamento dell'albero motore. Tutto questo si può osservare in Fig. 5.7.

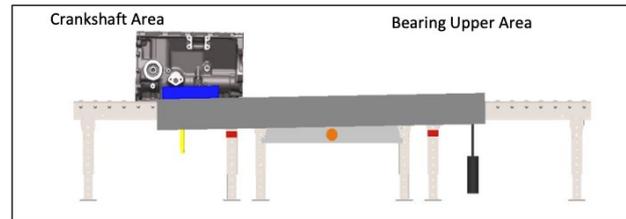


Fig. 5.7 Seconda parte del movimento dell'applicazione Karakuri
(Fonte: Pogowonto e Amrina, 2020)

Una volta alloggiato l'albero e i rispettivi cuscinetti inferiori, il basamento viene spinto verso la stazione successiva, liberando la piattaforma d'appoggio. Quest'ultima, grazie alla forza generata dalla molla e per l'effetto del contrappeso di 10 kg posto nell'estremità di destra, scatta verso l'alto facendo inclinare la guida verso destra e scorrere in maniera automatica la maschera nel punto di ingresso della stazione 2 CB. Questa soluzione Karakuri evita all'operatore di dover spostare avanti e indietro la maschera tra le due aree, eliminando così una movimentazione non necessaria, con un risparmio di 4 secondi sul tempo totale. Per valutare la bontà della soluzione Karakuri implementata, si misurano gli stessi parametri di tempo ciclo, tempo di movimentazione, numero di attività non a valore e indice di efficienza nello stato TO BE. I risultati sono riportati in Tab. 5.2, mediante confronto con i dati rilevati nello stato iniziale (Pogowonto e Amrina, 2020)¹³⁶.

Tab. 5.2 Confronto dei parametri del processo dello stato AS IS con lo stato TO BE
(Fonte: Pogowonto e Amrina, 2020)

Parameter	Before Improvement	After Improvement
Total Cycle Time	184 seconds	180 seconds
Total Moving Time	17 seconds	13 seconds
Total Non Value Added IF	7 activities 78%	5 activities 80%

¹³⁶ *Ibidem*

Con l'implementazione di questo dispositivo Karakuri nella movimentazione della maschera, il numero delle attività non a valore aggiunto scende a 5, avendo eliminato le corse di andata e ritorno compiute in precedenza dall'operatore per spostare manualmente la maschera. L'eliminazione di queste due attività comporta una riduzione di 4 secondi del tempo di movimentazione, poiché l'operatore impiegava 2 secondi per ogni spostamento della maschera. La riduzione del tempo di movimentazione determina, di conseguenza, una diminuzione del tempo ciclo totale della linea di assemblaggio secondaria portandolo a 180 secondi, ovvero entro il Takt Time richiesto. Si può dunque calcolare il nuovo indice di flusso (Pogowonto e Amrina, 2020)¹³⁷:

$$IF_{to\ be} = \frac{144}{144 + 23 + 13} = \frac{144}{180} = 80\%$$

Da ultima considerazione, la soluzione Karakuri consente, attraverso un meccanismo semplice, condiviso dagli operatori e senza l'utilizzo di corrente elettrica, di andare ad aumentare l'efficienza complessiva della stazione 2 CB del 2% (Pogowonto e Amrina, 2020)¹³⁸. Tuttavia, questo miglioramento determina una riduzione minima del tempo ciclo totale che, come si può osservare arriva a coincidere esattamente con il Takt Time. Questo caso potrebbe rappresentare il punto di partenza per un'analisi più approfondita che vada ad agire sulla riduzione della restante parte delle attività non a valore aggiunto, al fine di ottenere un margine di sicurezza rispetto al Takt Time più adeguato.

5.3 Rack di flusso Karakuri per la movimentazione nella logistica interna

Nel secondo caso studio viene presa in esame un'azienda manifatturiera situata a Taiwan, operante nel settore automotive, che produce paraoli per auto. In particolare, l'analisi viene condotta nel reparto in cui si svolgono le lavorazioni di

¹³⁷ *Ibidem*

¹³⁸ *Ibidem*

vulcanizzazione dei paraoli, per conferire alla gomma sintetica proprietà elastiche e aumentarne la resistenza a trazione, trasformando i semilavorati in prodotti finiti. Pertanto, si intende andare ad individuare e ridurre gli sprechi nelle movimentazioni, migliorando di conseguenza l'efficienza logistica nelle linee di produzione, attraverso l'applicazione delle tecniche Lean. Per valutare lo stato corrente, l'azienda decide di utilizzare la tecnica di mappatura VSM, al fine di ricostruire il flusso del valore che attraversa le linee di produzione (Chang e Lai, 2022)¹³⁹. Come si osserva in Fig. 5.8, il reparto di vulcanizzazione è formato da 31 stazioni di aggiunta zolfo (B1-H7) raggruppate in 8 aree distinte; ogni area ha una zona d'ingresso dei semilavorati e di uscita del prodotto finito e condivide con le altre aree una zona di cambio stampo, una zona di stoccaggio temporaneo dei prodotti finiti e una zona operativa in cui vengono eseguite le operazioni di conteggio, imballaggio e spedizione.

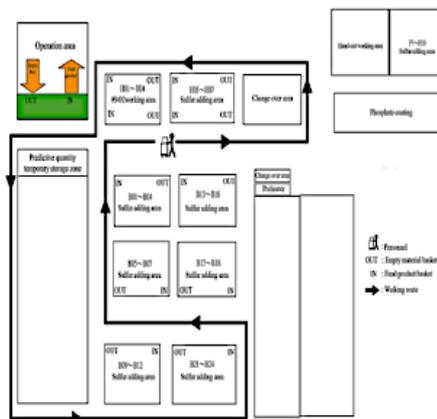


Fig. 5.8 Mappatura dello stato corrente della movimentazione interna dei materiali (Fonte: Chang e Lai, 2022)

Dalla mappatura dello stato attuale del flusso del valore emergono due temi che offrono interessanti opportunità di miglioramento: la gestione della movimentazione dei materiali tra le aree da parte di due addetti alla logistica e la gestione delle cassette di prodotto finito nell'area di conteggio. La trattazione in seguito si sviluppa con la descrizione della gestione corrente, per comprendere meglio gli sprechi rilevati, e la discussione delle relative contromisure proposte,

¹³⁹ Chang A., Lai P., 2022, Promoting the Application of Lean Automation - Take the Automobile Oil Seal Manufacturing Industry as an Example, *4th IEEE Eurasia Conference on IoT, Communication and Engineering*, pp. 541-546.

partendo dall'analisi delle movimentazioni dei materiali tra le aree effettuate dagli operatori logistici (Chang e Lai, 2022)¹⁴⁰.

Nello stato corrente, i prodotti finiti in uscita dalle aree di lavorazione vengono posti all'interno di una cassetta che, una volta riempita, viene spostata dall'operatore nel ripiano inferiore (*Final product*) del rack di movimentazione dei materiali, il quale scorre per gravità verso il basso; da qui l'addetto alla logistica preleva la cassetta di prodotto finito dal basso, la carica nel carrello di trasporto e ne ripone una vuota nel ripiano superiore (*Empty box*) del rack come si osserva in Fig. 5.9.

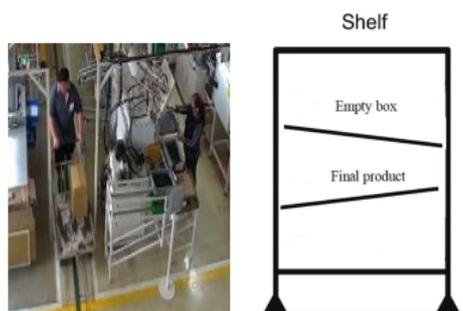


Fig. 5.9 Illustrazione e schema dello scaffale di movimentazione prodotti finiti nello stato attuale (Fonte: Chang e Lai, 2022)

Successivamente, l'addetto alla logistica continua a girare tra le varie aree, prelevando le cassette di prodotto finito fino a raggiungere una certa quantità che determina la necessità di recarsi presso la zona operativa per le operazioni di conteggio. Dall'analisi svolta mediante la mappatura si deducono una serie di sprechi di movimentazione, a causa dei continui movimenti non a valore che gli addetti alla logistica compiono prima di raggiungere la zona operativa. A questi, si aggiunge un peggioramento del fattore ergonomico e del livello di sicurezza, per il fatto che i due operatori devono trasportare più volte delle cassette dal peso di 30 kg. Inoltre, l'esigenza di dover raggiungere una certa quantità di prodotto finito stoccata nel carrello prima di arrivare presso la zona di conteggio e imballo genera uno spreco di scorte, aumentando ulteriormente il tempo di attraversamento totale. Nella mappatura dello stato futuro, la contromisura che il gruppo di lavoro identifica per far fronte alle problematiche riscontrate porta all'implementazione di due mezzi AGV per la logistica interna dei prodotti finiti, andando a sostituire i due addetti alla logistica con riferimento a questa tipologia di operazioni onerose e poco

¹⁴⁰ *Ibidem*

efficienti; il tempo liberato offre l'opportunità di dedicare le due persone all'esecuzione di attività a maggior valore aggiunto (Chang e Lai, 2022)¹⁴¹.

Gli AGV rappresentano una soluzione matura e flessibile nei trasporti logistici interni e possono essere integrati con le soluzioni di automazione Karakuri. Infatti, nella nuova configurazione del processo di movimentazione dei materiali, l'azienda stabilisce che le attività di carico delle cassette piene di prodotto finito e scarico delle cassette vuote avvenga nelle aree di lavorazione in modo automatico tramite gli AGV. Per rendere possibile questo, è indispensabile che le scaffalature e gli AGV lavorino in sinergia e proprio in questo ambito interviene l'approccio Karakuri Kaizen, con cui si progetta una nuova tipologia di scaffalature di movimentazione dei prodotti finiti nelle aree e un rack a rilascio laterale integrabile negli AGV.

Per quanto riguarda la scaffalatura, questa viene realizzata mediante l'utilizzo di tubi tondi d'acciaio per costruire il telaio su due livelli di ripiani scorrevoli, di cui uno inclinato; inoltre, vengono aggiunti due elementi innovativi rappresentati in Fig. 5.10: un sensore di pressione e un modulo di liberazione del prodotto finito.



Fig. 5.10 Rappresentazione rispettivamente del sensore di pressione e del modulo di liberazione del prodotto finito (Fonte: Chang e Lai, 2022)

Il sensore di pressione viene aggiunto verticalmente nella parte inferiore della scaffalatura e, una volta caricata la cassetta di prodotto finito, il suo peso ne determina l'attivazione attraverso un meccanismo a molla, rilasciando un segnale luminoso. Quando questo segnale entra in contatto con i sensori posti sull'AGV, si prenota la fermata del mezzo durante il passaggio nei pressi della scaffalatura. Il trasferimento automatico della cassetta di prodotto finito verso l'AGV viene

¹⁴¹ *Ibidem*

realizzato mediante il modulo di liberazione del materiale posizionato nel livello superiore della scaffalatura, il quale sfrutta i principi della leva. Questo è formato da un perno di bloccaggio che viene spinto verso il basso dalla pressione esercitata dall'AGV quando arriva in appoggio alla scaffalatura, permettendo alla cassetta di scorrere sopra al mezzo (Chang e Lai, 2022)¹⁴².

Questi elementi, ovvero ripiani scorrevoli, meccanismo a molla, segnale luminoso e modulo di liberazione del materiale, vanno a comporre la scaffalatura rappresentata in Fig. 5.11.

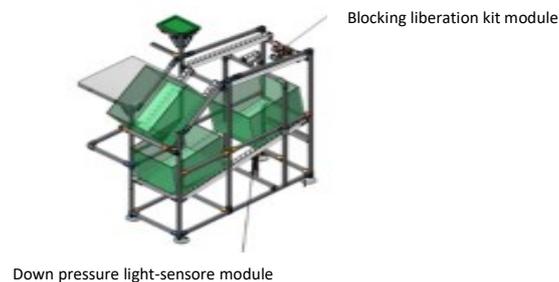


Fig. 5.11 Scaffalatura realizzata mediante approccio Karakuri Kaizen
(Fonte: Chang e Lai, 2022)

Partendo dal lato sinistro dell'immagine, si può osservare come la parte della scaffalatura rivolta verso l'operatore nel livello superiore spinga le cassette di prodotto finito e nel livello inferiore riceva le cassette vuote. Il lato destro, invece, è rivolto verso la corsia in cui corre l'AGV il quale, quando entra in contatto con la scaffalatura, carica la cassetta contenente i prodotti finiti attivando il modulo di sblocco sullo scaffale e, contemporaneamente, rilascia una cassetta vuota (Chang e Lai, 2022)¹⁴³.

Per quanto riguarda l'AGV, il trasferimento automatico delle cassette avviene attraverso un dispositivo Karakuri di rilascio laterale integrato direttamente sopra al mezzo, avente una configurazione simile a quella raffigurata in Fig. 5.12.

¹⁴² *Ibidem*

¹⁴³ *Ibidem*



Fig. 5.12 Esempio in commercio di dispositivo Karakuri a rilascio laterale integrabile su AGV
(Fonte: Item, 2024)

Questo dispositivo viene realizzato come di consueto mediante l'utilizzo di tubi tondi d'acciaio, rulliere per favorire lo scorrimento delle cassette e, a seconda della configurazione scelta, ruote o ventose per integrarlo nella parte superiore del mezzo AGV. La sua principale funzione è quella di consegnare automaticamente i vuoti e ricevere i pieni da uno scaffale all'AGV, semplicemente entrando in contatto con il sistema di rilascio della scaffalatura. Attualmente, questo dispositivo si può trovare in commercio nella sua configurazione standard al prezzo di € 1.024 (Item, 2024)¹⁴⁴.

Per concludere offrendo il quadro completo, in Fig. 5.13 si può notare il risultato dell'interazione dei due dispositivi, di cui si descrive in seguito il funzionamento (Chang e Lai, 2022)¹⁴⁵.



Fig. 5.13 Interazione tra il dispositivo Karakuri integrato nell'AGV e la nuova scaffalatura
(Fonte: Chang e Lai, 2022)

L'operatore carica la cassetta contenente il prodotto finito dal lato *assembly* dello schema in figura; il peso della cassetta attiva il sensore di pressione facendo in modo

¹⁴⁴ Item, www.item24us.online/solution-center

¹⁴⁵ *Ibidem*

che l'AGV si fermi nella medesima stazione; una volta che l'AGV arriva in appoggio alla scaffalatura, questo attiva il modulo che sblocca il movimento della cassetta di prodotto finito facendo sì che questa scorra verso l'AGV nel lato *logistics*; allo stesso tempo e con il medesimo meccanismo, l'AGV rilascia al livello inferiore una cassetta vuota che dal lato *delivery* scorre verso il lato *pick-up*, dove l'operatore può prelevarla per un nuovo riempimento.

Risulta evidente come dall'unione di questi due dispositivi realizzati mediante i principi Karakuri Kaizen si arrivi a creare un processo di movimentazione dei materiali automatizzato e a basso impatto energetico. Questo tipo di automazione, pertanto, consente di andare a migliorare le problematiche ergonomiche e di movimentazione dei materiali riscontrate nella mappatura iniziale, permettendo così di realizzare un nuovo funzionamento del percorso di movimentazione, come riportato nella mappatura TO BE in Fig. 5.14, realizzata dopo l'implementazione dei mezzi AGV in sinergia con le scaffalature Karakuri (Chang e Lai, 2022)¹⁴⁶. Attraverso l'implementazione delle soluzioni di miglioramento, i due AGV lavorano in modalità taxi: corrono lungo il reparto trasportando sempre una cassetta vuota e, una volta effettuata la fermata presso un'area di lavoro, scambiano quella vuota con quella piena, ripartendo immediatamente verso la zona operativa finale per le operazioni di conteggio, imballo e spedizione, ignorando le altre fermate.



Fig. 5.14 Mappatura della movimentazione interna dei materiali dopo l'implementazione delle soluzioni AGV e Karakuri (Fonte: Chang e Lai, 2022)

Pertanto, oltre a permettere di variare le attività degli operatori logistici, l'automazione realizzata consente di portare i prodotti finiti in modo più efficiente

¹⁴⁶ *Ibidem*

e veloce verso la zona operativa per la spedizione, riducendo anche gli sprechi legati alle scorte all'interno della fabbrica.

Individuata la soluzione per ottimizzare la logistica di produzione, il progetto di ottimizzazione passa a focalizzarsi sulla seconda area di miglioramento individuata attraverso la mappatura iniziale, ossia la gestione delle cassette di prodotto finito una volta arrivate nell'area operativa per le attività di conteggio, imballo e spedizione (Chang e Lai, 2023)¹⁴⁷. Nello stato iniziale, l'area operativa richiede l'impiego a tempo pieno di due addetti, uno dedicato alle operazioni di conteggio e imballo e l'altro esclusivamente al trasporto manuale dei contenitori nei pallet di spedizione. Anche in questo caso, sono stati individuati degli sprechi di movimentazione, in quanto l'operatore addetto al conteggio deve prelevare manualmente dall'AGV il contenitore di 30 kg e portarlo a piedi nella zona di conteggio e imballo; successivamente, l'altro addetto deve prelevare manualmente e trasportare il contenitore pieno su dei pallet in attesa della spedizione. Questo comporta inevitabilmente un aumento dei tempi di attraversamento, oltre a creare un maggior grado di affaticamento degli operatori a causa dell'attività di trasporto manuale di materiale pesante (Chang e Lai, 2023)¹⁴⁸. In questo secondo cantiere di miglioramento, l'azienda decide innanzitutto di sostituire i contenitori in plastica con dei cartoni al fine di diminuire non soltanto il peso complessivo movimentato dall'operatore ma anche l'impatto ambientale. La contromisura consiste nell'implementazione di una soluzione di automazione a basso costo attraverso i principi Karakuri Kaizen, andando a realizzare un rack di flusso FIFO, riportato in Fig. 5.15. Questo sistema utilizza gli elementi di base caratteristici dei dispositivi Karakuri, sfruttando il principio della gravità, mediante una cremagliera inclinata che consente lo scorrimento dei cartoni.

¹⁴⁷ Chang A., Lai P., 2023, Promoting the Application of Lean Automation - Take the Automobile Oil Seal Manufacturing Industry as an Example, *IEEE 5th Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering*, pp. 948-951.

¹⁴⁸ *Ibidem*



Fig. 5.15 Rack di flusso Karakuri per la movimentazione dei cartoni
(Fonte: Chang e Lai, 2023)

In questo modo, quando il mezzo AGV arriva nell'area operativa nei pressi del rack di flusso Karakuri della stazione di conteggio, l'addetto al conteggio realizza le operazioni mostrate in Fig. 5.16 (Chang e Lai, 2023)¹⁴⁹: (1) sblocca manualmente il cartone contenente i prodotti finiti e lo spinge verso la cremagliera; (2) carica il livello inferiore dell'AGV con un cartone vuoto e lo fa ripartire per un nuovo giro di carico; (3) l'operatore si sposta nella parte centrale della stazione di conteggio, dove nel frattempo è giunto il cartone precedentemente fatto avanzare, per effettuare le operazioni di conteggio e imballaggio.



Fig. 5.16 Sequenza delle operazioni effettuate dall'addetto al conteggio
(Fonte: Chang e Lai, 2023)

A fianco della stazione di conteggio e imballaggio viene posto un carrello con ruote che, una volta riempito, lo stesso operatore va a trasportare nei pallet in attesa della spedizione, come raffigurato in Fig. 5.17.

¹⁴⁹ *Ibidem*

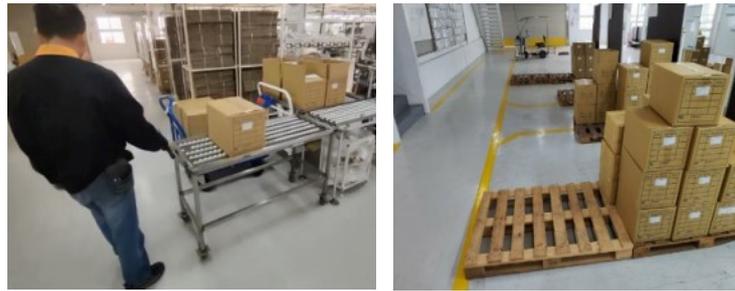


Fig. 5.17 Trasporto dei cartoni di prodotto finito nella zona spedizioni
(Fonte: Chang e Lai, 2023)

Anche in questa seconda soluzione, l'implementazione di soluzioni Karakuri porta a diminuire l'utilizzo della manodopera di operatori, mantenendone soltanto uno a tempo pieno e convertendo l'altro operatore verso attività maggiormente a valore. Inoltre, attraverso l'uso del rack di flusso e del carrello di trasporto, si determinano miglioramenti in termini di aumento del grado di ergonomia del processo, senza ricorrere all'uso di energia elettrica, tempi del processo e tempo di fermata da parte del mezzo AGV (Chang e Lai, 2023)¹⁵⁰.

Con questo caso studio, si è voluto mettere in evidenza come per entrambe le aree di miglioramento si ottengono significativi miglioramenti in termini di efficienza ed ergonomia nella movimentazione dei materiali attraverso l'implementazione dei mezzi AGV integrati con i dispositivi Karakuri e con la realizzazione dei rack di flusso Karakuri. Tuttavia, si sostiene che emergano delle mancanze per quanto riguarda la rilevazione quantitativa dei dati nella VSM proposta; infatti, non viene effettuata una misurazione delle attività a valore e non a valore e relativo indice di flusso. Questo porta a limitazioni nella fase di Check del ciclo PDCA, che avrebbero consolidato i miglioramenti proposti e sostenuto l'efficacia dell'automazione Karakuri passando dalla situazione AS IS a quella TO BE. Inoltre, si ritiene possa esserci una fonte di ulteriore sviluppo nell'ambito della seconda area di miglioramento, mediante la possibile creazione di un meccanismo Karakuri in grado di liberare l'operatore dall'attività di sblocco manuale dei cartoni dall'AGV alla cremagliera del rack di flusso, dove permane un'attività non a valore che potrebbe essere eliminata nella definizione dello stato futuro ottimizzato del flusso.

¹⁵⁰ *Ibidem*

5.4 Dispositivo Karakuri per il posizionamento automatico di Udc a scaffale

Si prende ora in analisi il caso riguardante un'azienda fornitrice di componenti per il settore automobilistico situata in Turchia. L'obiettivo di questo studio è quello di analizzare il livello di rischio ergonomico associato alle attività di movimentazione delle Unità di carico (Udc) di componenti realizzate in una linea di produzione ad alta intensità di manodopera. Questa tematica merita particolare attenzione in quanto i disturbi muscoloscheletrici associati ad attività con un basso indice ergonomico generano problemi alla salute dell'operatore, che per l'azienda si traducono in un aumento dei costi dovuti alla perdita di manodopera e produttività. Attraverso l'applicazione dei principi di automazione Lean a basso costo, questo caso porta alla proposta di una soluzione di miglioramento di tipo Karakuri con particolare attenzione al livello di rischio ergonomico per l'operatore (Özcan, 2022)¹⁵¹. Viene rappresentata in Fig. 5.18 la mappatura del flusso delle attività di movimentazione riportando le fasi che descrivono il processo; in particolare, all'interno della linea produttiva si possono distinguere tre zone: una zona di produzione (1), una zona di controllo visivo (2) e una zona di stoccaggio (3).

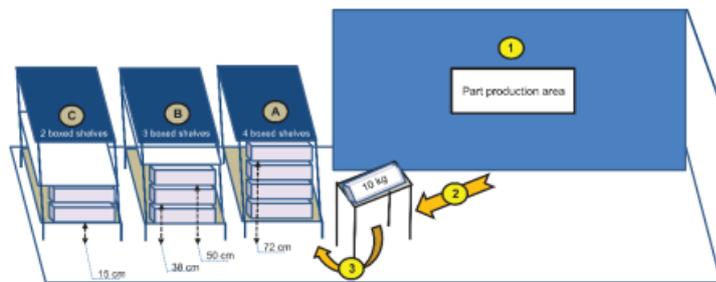


Fig. 5.18 Flusso delle attività di movimentazione nella linea produttiva (Fonte: Özcan, 2022)

Nella zona 1 vengono prodotti un totale di 675 pz/turno di componenti di tre diverse referenze A, B, C con un tempo ciclo di 120 secondi; i pezzi prodotti vengono stoccati a quantità di 5 pz in una scatola che costituisce l'Udc con capienza massima pari a 5. Un pezzo pesa 2 kg, per cui ogni Udc ha un peso totale di 10 kg. Il percorso

¹⁵¹ Özcan A. G., 2022, Application Of Reba And Karakuri Kaizen Techniques To Reduce Ergonomic Risk Levels In A Workplace, *Journal of Engineering Sciences and Design*, vol. 10, n. 4, pp. 1430 – 1444.

attuale effettuato dall'operatore dalla linea di produzione allo stoccaggio prevede le seguenti fasi: una volta prodotto il componente nella zona (1), l'operatore passa nella zona (2) in cui esegue un controllo visivo per individuare eventuali scarti di produzione e, dopo averlo controllato, lo posiziona nell'Udc appoggiata sopra un banco fisso, fino al raggiungimento della quantità di cinque pezzi a completamento di portata dell'unità di carico; infine, passa nella zona (3) adibita allo stoccaggio e composta da tre scaffalature A, B e C, con posti dedicati in ogni scaffale rispettivamente per le Udc delle referenze A, B e C. La scaffalatura A contiene 4 Udc sovrapposte, B ne contiene 3 e infine C ne contiene 2; l'operatore trasporta una Udc alla volta prelevandola dal banco fisso e iniziando a riempire la scaffalatura, ad esempio A, partendo dal piano inferiore a un'altezza di 15 cm, passando al secondo di 38 cm, al terzo di 50 cm e, infine, all'ultimo piano a un'altezza di 72 cm. Con una produzione di 675 pz/turno la frequenza con cui l'operatore effettua il sollevamento e trasporto delle Udc dal peso di 10 kg, attività ripetitiva e che genera movimenti bruschi, è pari a 135 volte/turno; inoltre, il tempo ciclo iniziale rilevato è pari a 120 secondi (Özcan, 2022)¹⁵².

Per valutare il livello di rischio ergonomico di partenza, le considerazioni vengono condotte attraverso l'uso di un metodo di analisi ergonomica e misurazione antropometrica. Poiché le attività di posizionamento, sollevamento e trasporto eseguite dall'operatore sono ripetitive, improvvise e coinvolgono tutte le parti del corpo, si sceglie di utilizzare il metodo REBA, uno dei metodi di osservazione diretta per la valutazione del livello ergonomico che stabilisce un punteggio da 1 (ottimo) a 15 (pessimo) in base ai carichi che gravano sulle zone del tronco, collo, gambe, parte superiore e inferiore delle braccia e polsi, distinguendo inoltre se la postura assunta durante l'attività in esame è statica o dinamica. L'analisi si concentra in particolare sulla scaffalatura A, poiché questa racchiude tutte e quattro le diverse altezze a cui l'operatore deve far fronte nell'esecuzione dei movimenti. Partendo dalle considerazioni riguardanti le misurazioni antropometriche rappresentate in Fig. 5.19, i dati della situazione attuale sono rilevati tramite osservazione diretta durante le operazioni di movimentazione effettuate nella

¹⁵² *Ibidem*

scaffalatura A, prendendo come altezza standard di riferimento quella di un operatore maschile con una misura compresa tra i 165 e 185 cm (Özcan, 2022)¹⁵³.

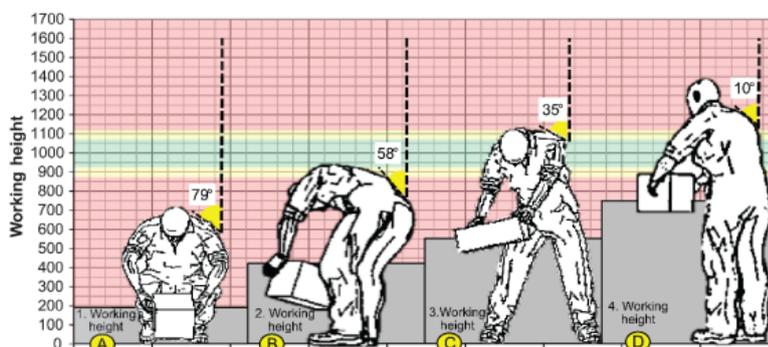


Fig. 5.19 Misurazioni antropometriche nello stato attuale
(Fonte: Özcan, 2022)

Si nota come le posture che assume il tronco dell'operatore variano in maniera considerevole a seconda del livello in cui ripone una sopra l'altra le unità di carico di 10 kg. Dovendo sollevare e trasportare una ad una le scatole, partendo dal livello più basso (A), l'operatore si piega e l'angolo che viene a crearsi tra l'asse del corpo e la colonna vertebrale è di 79°. Posizionando la seconda scatola sullo scaffale (B) l'angolazione varia a 58°, passando poi a 35° per la terza (C) e, infine, diminuendo fino a 10° per l'ultima scatola posizionata (D). Ne risulta che le prime tre posizioni assunte, per una persona la cui altezza media standard è di 170 cm, sono le più gravose a livello del carico scaricato in modo ripetitivo sulla colonna vertebrale, mentre l'ultima posizione assunta risulta essere la più favorevole, in linea con una condizione di lavoro ideale. Dal risultato di queste misurazioni, si prende quindi in esame la posizione più gravosa assunta dell'operatore, ovvero la prima posizione (A) in cui subisce una variazione d'angolo di postura pari a 79°; su questa viene effettuata l'analisi ergonomica con metodo REBA (Özcan, 2022)¹⁵⁴.

Questa analisi si svolge tramite osservazione diretta, dividendo i distretti del corpo in due gruppi: gruppo A (tronco, collo e gambe) e gruppo B (parte superiore e inferiore delle braccia e polsi). Viene quindi assegnato un punteggio a seconda del grado di flessione o estensione dei vari distretti. I risultati dell'analisi REBA della situazione maggiormente critica nello stato attuale sono riportati in Fig. 5.20.

¹⁵³ *Ibidem*

¹⁵⁴ *Ibidem*

Body Posture	Group A			Group B			
		Movement	Score		Movement	Score	
	A-Body	>60 flexion	4	B-Upper arm	45-90 flexion	3 -1	
	A-Neck	>20 flexion or extension	2	B-Lower arm	60-100 flexion	1	
	A-Leg	Legs Bilateral weight, carrying, walking, or sitting	1 +2	B-Wrist	0-15 flexion or extension	1 +1	
	Group A Score			7	Group B Score		
	Load	10 kg	1 +1	Grip	Appropriate	1	
A Score			9	B Score			3
C Score						7	
Activity						1	
REBA Score						8	

Fig. 5.20 Analisi REBA della situazione maggiormente critica allo stato attuale (Fonte: Özcan, 2022)

Partendo ad analizzare i distretti del gruppo A, si nota come il tronco sia inclinato di 79° (4 punti) con una flessione in avanti del collo superiore a 20° (2 punti) e le gambe vengano usate bilateralmente (1 punto) compiendo una flessione di 60° (+2 punti) nel posizionare la scatola. Il punteggio parziale di 7 punti relativo allo Score A si ottiene attraverso l'intersezione del punteggio delle singole parti nella tabella REBA per il gruppo A (Tab. 5.3), a cui vanno aggiunti 2 punti relativi al peso del carico movimentato (1 punto) e alla rapidità del movimento (+1 punto), per un punteggio totale di 9 punti.

Tab. 5.3 Tabella REBA per determinare score A (Fonte: adattamento da Özcan, 2022)

Scores

Table A		Neck															
		1				2				3							
		Legs			Legs			Legs			Legs						
Trunk posture score	1	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
	3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
	4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9
	5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9	8	9	9	9

Passando poi ai distretti appartenenti al gruppo B, la parte superiore delle braccia compie una flessione compresa tra 45° e 90° (3 punti) supportata dal piano d'appoggio dello scaffale (-1 punto); la parte inferiore subisce una flessione che varia tra 60° e 100° (1 punto) e i polsi compiono una flessione compresa tra 0° e 15° (1 punto) e una piegatura rispetto al centro (+1 punto). Entrando nella tabella REBA per il gruppo B (Tab. 5.4), intersecando i vari punteggi, si ottiene un risultato

parziale per lo Score B di 2 punti, a cui si aggiunge il punteggio di 1 punto per la presa appropriata ma non ideale, che porta al punteggio totale di 3 punti.

Tab. 5.4 Tabella REBA per determinare score B (Fonte: adattamento da Özcan, 2022)

Table B		Lower arm					
		1			2		
		Wrists			Wrists		
		1	2	3	1	2	3
Upper arm	1	1	2	2	1	2	3
	2	1	2	3	2	3	4
	3	3	4	5	4	5	6
	4	4	5	5	4	5	5
	5	6	7	8	7	8	8
	6	6	7	8	8	9	9

A questo punto, Score A e Score B vengono incrociati entrando nell'ultima tabella REBA per determinare lo Score C (Tab. 5.5). Con i punteggi totali ottenuti nel gruppo A (9 punti) e nel gruppo B (3 punti), si ottiene il punteggio relativo allo score C di 7 punti, a cui si aggiunge un 1 punto relativo alla tipologia di attività ripetitiva ed eseguita per brevi intervalli.

Tab. 5.5 Tabella REBA per determinare score C (Fonte: adattamento da Özcan, 2022)

Table C		A Score												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
B score	1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7	7
	2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8	8
	3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8	8
	4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
	5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9	9
	6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10	10
	7	7	7	7	8	9	9	9	10	10	11	11	11	11
	8	8	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11	11	11
	9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12	12
	10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12
	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Ne consegue che il grado di ergonomia del processo, dato dalla somma dello Score C con il punteggio della tipologia di attività, ottiene uno Score REBA allo stato iniziale di 8 punti, che si assesta a metà come livello di gravosità nella scala che va da 1 a 15 (Özcan, 2022)¹⁵⁵.

Appurata, quindi, l'esistenza di un problema ergonomico di una certa rilevanza, l'azienda propone di sviluppare internamente una soluzione d'automazione che intervenga nel movimento verticale dell'operatore, assistendolo e facendolo lavorare a un'altezza confortevole. Sempre con riferimento alle misure standard di

¹⁵⁵ *Ibidem*

altezza dell'operatore (170 cm), questa misura si attesta a 1 metro. Si ricorre, quindi, all'approccio Karakuri Kaizen per realizzare un dispositivo a basso costo che automatizza il movimento verticale compiuto dall'operatore, mantenendo il piano di lavoro in maniera lineare all'altezza di 1 metro. Questo consiste in un carrello di trasporto con integrato un sistema di sollevamento automatico delle Udc, regolabile in altezza, in grado di soddisfare le tre diverse posizioni verticali della scaffalatura A, B, C e mantenere costante la posizione di lavoro dell'operatore; inoltre, vengono aggiunte alle scaffalature delle rulliere per far scorrere le Udc (Özcan, 2022)¹⁵⁶. Come si vede in Fig. 5.21, il carrello Karakuri progettato è in grado di trasportare massimo 4 Udc per volta indipendentemente dalla referenza, con un funzionamento che sfrutta i principi della forza di gravità e del sistema di contrappesi regolabili a seconda del numero di Udc caricate. Viene realizzato mediante la combinazione degli elementi di base quali carrucola e puleggia con cavo in acciaio da 6 mm; questi fanno muovere lungo l'asse verticale una piastra con rulli (3), posta all'altezza di 1 metro nella posizione di lavoro iniziale, che costituisce la base d'appoggio della prima scatola.

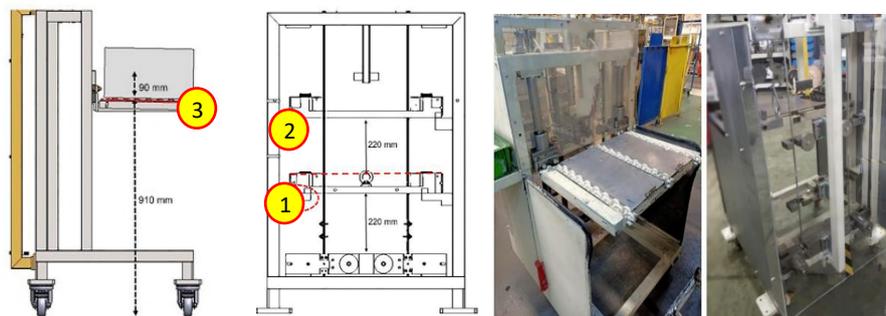


Fig. 5.21 Rappresentazione schematica e reale della struttura del carrello Karakuri
(Fonte: adattamento da Özcan, 2022)

La piastra è inclinata verso il basso di 5°, con un sistema di fermi meccanici che le impedisce di scivolare fuori. Inoltre, la struttura è dotata di fermi di arresto che permettono di regolare l'altezza massima della piastra a seconda del tipo di referenza; questa si ferma in corrispondenza del fermo (1) per la referenza C che richiede due Udc e in corrispondenza del fermo (2) per la referenza B che richiede

¹⁵⁶ *Ibidem*

tre Udc, mentre per la referenza A raggiunge la massima estensione della corsa verticale senza l'intervento di regolazione dei fermi, poiché richiede il pieno carico di quattro Udc. Con questo dispositivo, l'operatore è supportato durante tutte le operazioni di carico e scarico e si va a sostituire l'appoggio fisso precedentemente utilizzato come base di supporto per l'Udc da riempire (Özcan, 2022)¹⁵⁷.

Nella situazione ottimizzata con l'automazione Karakuri, il flusso delle attività rimane invariato, poiché si interviene sulla modalità di esecuzione delle stesse. Nel caso della scaffalatura A oggetto dell'analisi ergonomica, le attività di movimentazione compiute dall'operatore si svolgono come di seguito descritto. Nella fase iniziale del processo di caricamento, l'operatore posiziona la scatola vuota sulla piastra scarica e inizia a riempirla con i pezzi finiti e controllati; la scatola rimane ad un'altezza costante di 1 metro fino a quando viene raggiunto il peso di 10 kg; a questo punto, mediante il sistema a contrappesi, la piastra scatta verso il basso consentendo all'operatore di sovrapporre un'altra scatola vuota, che viene a trovarsi all'altezza di 1 metro pronta per essere riempita. Con questo meccanismo, l'operatore riesce a riempire e impilare 4 Udc lavorando sempre all'altezza ergonomica di 1 metro. Il carrello viene successivamente spostato in prossimità della scaffalatura corrispondente alla referenza prodotta, come in Fig. 5.22. Una volta allineato il carrello alla scaffalatura A, tramite la pressione generata dal contatto con il dispositivo Karakuri, viene sbloccato in modo automatico il meccanismo di ritenuta facendo scivolare le scatole dentro la scaffalatura (Özcan, 2022)¹⁵⁸.



Fig. 5.22 Esempio di allineamento del carrello Karakuri alla scaffalatura A (Fonte: Özcan, 2022)

¹⁵⁷ *Ibidem*

¹⁵⁸ *Ibidem*

Dopo l'adozione della soluzione Karakuri, il team di lavoro effettua nuovamente le misurazioni relative agli aspetti antropometrici ed ergonomici, per verificare il reale beneficio ottenuto. Dall'analisi antropometrica riportata in Fig. 5.23, ci si può rendere conto immediatamente che, grazie al carrello Karakuri, la postura assunta dal busto dell'operatore rimane costante ed ergonomica a 1 metro durante tutto il processo di movimentazione dei componenti, senza variare l'altezza a seconda della tipologia di riferimento come accadeva nello stato iniziale.

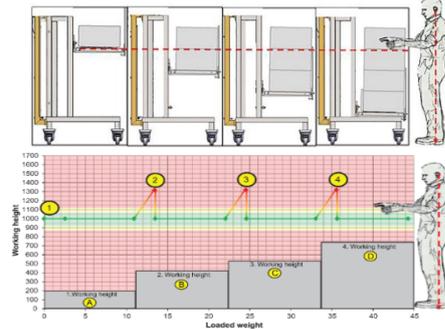


Fig. 5.23 Analisi antropometrica dopo l'implementazione della soluzione Karakuri (Fonte: adattamento Özcan, 2022)

Per verificare anche quantitativamente i risultati ottenuti, nella fase di Check viene eseguita la nuova analisi REBA riportata in Fig. 5.24. Si può apprezzare come la nuova postura eretta assunta dall'operatore comporti rischi inferiori per mancanza di flessione e piegamenti nel tronco e nelle gambe, riscontrando solamente una leggera flessione del collo (Özcan, 2022)¹⁵⁹.

Body Posture	Group A		Group B			
	Movement	Score	Movement	Score		
	A-Body	Upright posture	1	B-Upper arm	<20 flexion or extension	1
	A-Neck	0-20 flexion	1	B-Lower arm	60-100 flexion	1
	A-Leg	Legs Bilateral weight, carrying, walking, or sitting	1	B-Wrist	0-15 flexion or extension	1 +1
	Group A Score		1	Group B Score		2
	Load	2 kg	0 +1	Grip	Good	0
	A Score		2	B Score		2

C Score	2
Activity	1
REBA Score	3

Fig. 5.24 Analisi REBA dopo l'implementazione della soluzione Karakuri (Fonte: Özcan, 2022)

Il punteggio relativo al gravare del carico di 10 kg viene pertanto azzerato, avendo eliminato con la soluzione Karakuri il processo di sollevamento verticale e

¹⁵⁹ *Ibidem*

spostamento all'interno della scaffalatura. Inoltre, viene azzerato il punteggio relativo alla presa nel trasporto dell'Udc, poiché le scatole non vengono più trasportate manualmente una alla volta.

Ne consegue una diminuzione dello Score REBA finale nella nuova configurazione, che passa da 8 punti a 3 punti, ottenendo così un beneficio ergonomico che si traduce in un livello di rischio basso. Questa è la conseguenza di aver eliminato le attività di sollevamento, trasporto e spinta delle Udc, riducendo quindi il rischio di infortuni e preservando la forza lavoro. L'eliminazione delle attività non a valore ed ergonomicamente rischiose di sollevamento e trasporto consente una riduzione del tempo ciclo da 120 secondi a 100 secondi, con un aumento di efficienza del 17%. Inoltre, si rileva una significativa diminuzione della frequenza di trasporto e movimentazione, che passa da 135 volte/turno a 45 volte/turno, con una riduzione pari al 33% (Özcan, 2022)¹⁶⁰. Infatti, con una produzione invariata a 675 pz/turno e 135 Udc da stoccare, poiché ogni scaffalatura A, B e C viene riempita rispettivamente con colonne impilate di 4 Udc, 3 Udc e 2 Udc, per completare il riempimento delle scaffalature servono 15 file totali di Udc impilate. Grazie al dispositivo Karakuri, l'operatore impiega potenzialmente 3 accessi per completare una fila composta dalle Udc A, B e C impilate, che poi scorrono all'interno della scaffalatura; quindi, per completare il riempimento di tutta la giacenza gli basteranno 45 accessi rispetto ai 135 iniziali. In conclusione, questo caso testimonia l'implementazione di una soluzione Karakuri per rispondere a un'esigenza di miglioramento delle tematiche di ergonomia, che in ogni caso comporta benefici importanti anche sul fronte dell'efficienza produttiva.

5.5 Trasportatore Karakuri applicato a un processo di cottura

In questo caso studio, si considera un'azienda del settore alimentare situata in Indonesia produttrice di una tipica torta tradizionale locale a base di farina di riso, zucchero e frutta. Per far fronte a un aumento della domanda, l'azienda decide di

¹⁶⁰ *Ibidem*

rivedere il processo di produzione al fine di attuare dei miglioramenti in ottica Lean. Tale processo si suddivide in quattro fasi: preparazione degli ingredienti, miscelazione, cottura e confezionamento (Anggrahini et al., 2020)¹⁶¹. Nello stato attuale le attività vengono eseguite manualmente da 2 operatori: uno si occupa della preparazione degli ingredienti, l'altro della miscelazione e movimentazione delle preparazioni che vengono versate in apposite teglie da infornare, ognuna delle quali contenente otto stampi. La prima fase di preparazione degli ingredienti è particolarmente delicata in quanto incide sulla qualità del prodotto finale, per questo viene dedicato un operatore a tempo pieno che ha il compito di lavare e frullare la frutta e preparare gli altri ingredienti. Successivamente, questi vengono versati in un miscelatore dove il secondo operatore mescola energicamente a mano tutti gli ingredienti, effettuando poi la colata nei rispettivi stampi. A questo punto, lo stesso operatore prende manualmente la teglia e la trasporta velocemente nel forno, che rimane acceso durante tutto il turno di lavoro in maniera continua al fine di mantenere costante la temperatura. Questo secondo operatore controlla visivamente il livello di cottura e, una volta completato, sposta manualmente la teglia per la fase di raffreddamento e confezionamento finale.

Per monitorare lo stato attuale del processo, vengono rilevati i parametri principali quali tempi ciclo delle singole attività, tempo di attraversamento e capacità produttiva giornaliera. Si riportano i risultati in Tab. 5.6 (Anggrahini et al., 2020)¹⁶².

Tab. 5.6 Prestazioni del processo allo stato attuale
(Fonte: adattamento da Anggrahini et al., 2020)

Parameter	Before Improvement
Cycle time - 1 st Station Preparation (seconds)	702.063
Cycle time - 2 nd Station Mixing Process (seconds)	1,102.774
Cycle time - 3 rd Station Baking Process (seconds)	3,140.626
Cycle time - 4 th Station Packaging Process (seconds)	425.115
Production time (seconds/unit)	671.322
Manufacturing lead time (minutes)	626.567
Production capacity (unit)	50

¹⁶¹ Anggrahini D., Prasetyawan Y., Diartiwi S. I., 2020, Increasing Production Efficiency using Karakuri Principle (A Case Study in Small and Medium Enterprise), *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 852.

¹⁶² *Ibidem*

Come si può osservare dalla tabella, attualmente il processo di produzione delle torte ha una capacità giornaliera di lavorazione di 50 unità, con un tempo di attraversamento totale di 627 minuti e un tempo di produzione unitario di 671 secondi, ovvero 11 minuti. Risulta evidente come il tempo ciclo totale della terza stazione relativa alla fase di cottura rappresenti il collo di bottiglia del processo, con un tempo di 3.141 secondi, ovvero di 52 minuti, nettamente superiore rispetto ai tempi ciclo delle altre stazioni. Questo è causato dalla movimentazione generata dall'operatore durante lo spostamento manuale della teglia dalla stazione di miscelamento alla stazione di cottura e, successivamente, dalla stazione di cottura alla stazione di confezionamento; oltre a comportare uno spreco, queste movimentazioni sottopongono l'operatore al rischio di scottature. Inoltre, il funzionamento continuo del forno comporta un notevole consumo di energia elettrica, creando un impatto ambientale negativo.

Alla luce di queste problematiche riscontrate nella situazione attuale, l'azienda decide di implementare un nuovo sistema con l'obiettivo di andare a eliminare gli sprechi nelle movimentazioni della teglia e ad aumentare la sicurezza per l'operatore. Il nuovo sistema, posto di lato alla stazione di miscelazione, prevede un forno automatizzato integrato con sensori di prossimità e un trasportatore automatico a rulli, realizzato attraverso i principi Karakuri di automazione a basso costo (Anggrahini et al., 2020)¹⁶³. La nuova configurazione del sistema forno con integrato il trasportatore Karakuri è rappresentato in Fig. 5.25.

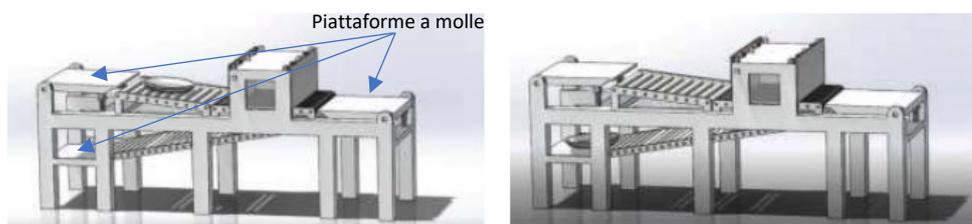


Fig. 5.25 Nuovo sistema forno con trasportatore Karakuri
(Fonte: adattamento da Anggrahini et al., 2020)

Il trasportatore a rulli Karakuri viene realizzato sfruttando la forza gravitazionale, andando a creare due piani di scorrimento a rulli con diversi livelli di inclinazione,

¹⁶³ *Ibidem*

tenuti insieme verticalmente da una struttura in alluminio e lateralmente da dei cuscinetti. Nella parte superiore dei piani, sono presenti tre piattaforme rettangolari dotate di molle, poste al livello superiore rispettivamente nel punto iniziale e all'interno del forno e al livello inferiore nella zona di arrivo della teglia. La molla posta sotto la piattaforma si deforma sotto l'azione del peso del preparato versato nella teglia, inclinando la piattaforma e consentendone il passaggio nel trasportatore a rulli. Il nuovo forno è composto da un riscaldatore in alluminio rettangolare dotato di un nastro trasportatore con sensore di prossimità, interruttore di fine corsa e timer preimpostato. Il sensore di prossimità permette di rilevare il passaggio della teglia, aprendo la porta in entrata del riscaldatore e attivando resistenza e timer. Una volta terminata la cottura secondo il tempo standard preimpostato, la teglia viene fatta scendere attraverso il trasportatore al livello inferiore, dove un altro sensore di prossimità consente l'apertura e la chiusura della porta del riscaldatore all'uscita della teglia sul trasportatore Karakuri.

Attraverso questa nuova configurazione, il numero di operatori impiegati nel processo rimane invariato: il primo operatore resta dedicato alla fase di preparazione degli ingredienti, mentre il secondo operatore si dedica alla fase di miscelazione e confezionamento. Grazie al trasportatore Karakuri integrato con il nuovo sistema forno, il secondo operatore rimane fermo nella sua postazione, senza dover più trasportare avanti e indietro la teglia e controllarne la cottura. Infatti, si è visto che, dopo aver versato la miscela, la teglia scorre automaticamente verso la cottura, dove il forno automatizzato la cucina secondo il tempo standard e il trasportatore Karakuri la riporta nella stazione finale per il raffreddamento e confezionamento.

A questo punto viene verificato l'effettivo miglioramento dei parametri di efficienza rispetto alla situazione iniziale. Come si osserva in Tab. 5.7, il tempo ciclo della terza stazione collo di bottiglia è sensibilmente diminuito passando a 2.257 secondi con una riduzione di 883 secondi pari al 39% (Anggrahini et al., 2020)¹⁶⁴.

¹⁶⁴ *Ibidem*

Tab. 5.7 Prestazioni del processo dopo le soluzioni di miglioramento
(Fonte: adattamento da Anggrahini et al., 2020)

Parameter	After Improvement	Δ
Cycle time - 1 st Station Preparation (seconds)	702.063	0
Cycle time - 2 nd Station Mixing Process (seconds)	1,102.217	0.557
Cycle time - 3 rd Station Baking Process (seconds)	2,257.1	883.526
Cycle time - 4 th Station Packaging Process (seconds)	425.115	0
Production time (seconds/unit)	545.229	126.093
Manufacturing lead time (minutes)	572.491	54.076 minutes
Production capacity (unit)	56	6

Le migliorie apportate al processo consentono di ottenere un risparmio di 54 minuti rispetto al Lead time iniziale, con il conseguente risultato di un aumento di produzione di 6 unità al giorno. Infatti, il tempo di produzione unitario è passato da 11 minuti a 9 minuti, liberando capacità produttiva per le ulteriori 6 unità; si arriva così a una produzione giornaliera totale di 56 unità. Inoltre, l'integrazione del forno abbinato con sensori di prossimità e con il trasportatore Karakuri consente l'accensione soltanto nel momento in cui la teglia transita nel trasportatore, ottenendo un risparmio di energia elettrica del 45% (Prasetyawan et al., 2020)¹⁶⁵. Si intende infine segnalare come possibile limitazione dell'analisi condotta la mancanza di una valutazione per quanto riguarda il bilanciamento dei carichi di lavoro tra i due operatori, che rimane invariata nel passaggio dal processo AS IS a quello TO BE, e un'analisi delle attività non a valore. Questo passaggio potrebbe consentire un'ulteriore riduzione del tempo ciclo e del tempo di attraversamento. In sintesi, questo caso studio intende dimostrare come l'applicazione dei principi Karakuri, anche in un settore diverso da quello automotive visto finora, offra l'opportunità di agire sulle tematiche di efficienza e sostenibilità. Tutto questo andando a ridurre gli sprechi di movimentazione, con un aumento di produttività e grado di sicurezza ed ergonomia per l'operatore e, allo stesso tempo, una diminuzione dell'impatto ambientale del processo.

¹⁶⁵ Prasetyawan Y., Agustin A. A., Anggrahini D., 2020, Simple Automation For Pineapple Processing Combining With Karakuri Design, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 852.

5.6 Strumento di risoluzione delle problematiche di progettazione secondo l'approccio Karakuri Kaizen

Nell'ultimo caso studio preso in esame si è scelto di dare particolare attenzione ad un'implementazione che si è focalizzata sul tema della centralità degli operatori e del problem solving creativo. Viene trattato un metodo di risoluzione dei problemi sperimentato da alcuni ricercatori nel contesto manifatturiero svedese, che fornisce alle aziende uno strumento concettuale per aiutare gli operatori nella trattazione di problematiche di carattere progettuale inerenti la scelta di nuove tecnologie oppure emerse nella routine operativa quotidiana. In particolare, in questo caso studio ci si focalizza sulla risoluzione di problematiche comuni quali l'invio di ordini di produzione all'interno della fabbrica o il controllo dello stato delle macchine localizzate in posizione diverse, che richiedono ripetuti spostamenti da parte dell'operatore. Questa tipologia di situazioni può essere agevolmente risolta attraverso l'implementazione di tecnologie IoT per favorire la raccolta e lo scambio dei dati in tempo reale. Gli operatori sono coloro che detengono il know-how del processo ma non le competenze tecnico-informatiche e, grazie a questo metodo, hanno la possibilità di discutere e proporre le soluzioni da implementare (Muñoz et al., 2020)¹⁶⁶.

Negli ultimi anni, lo sviluppo esponenziale delle soluzioni digitali ha consentito un'ampia diffusione della parte hardware dei sensori, abbassando il prezzo e consentendo l'accesso ad una quota di mercato maggiore, con nuove opportunità di sviluppo specialmente nel settore industriale. Se la parte hardware risulta di facile e rapido accesso, la parte concettuale di progettazione di queste soluzioni rimane quella maggiormente complessa e che richiede il maggior investimento di tempo. Proprio per far fronte a questo e supportare, quindi, una realizzazione efficiente e consapevole della tecnologia IoT, un team di ricercatori svedesi composto da figure con specializzazioni in ambiti come industrializzazione IoT, miglioramento continuo attraverso metodi di Lean Management e progettazione hardware, hanno

¹⁶⁶ Muñoz A. A., Florin U., Eriksson Y., Yamamoto Y., Sandström K., 2020, The Karakuri Card Deck: Co-Designing Industrial IoT Conceptual Solutions, *Atti Della Design Society: DESIGN Conference*, vol.1, pp. 807 – 816.

ideato uno strumento che accompagna il personale operativo dell'azienda nella realizzazione di soluzioni IoT con sensori a basso costo, traendo ispirazione dall'approccio Karakuri Kaizen. Uno dei cardini dell'approccio Karakuri Kaizen risiede nell'individuare i problemi direttamente nel genba e risolverli con consapevolezza, attraverso metodi semplici che portino a un miglioramento continuo del processo (Muñoz et al., 2020)¹⁶⁷. Lo strumento proposto consiste in schede di progettazione modulari e personalizzabili che prendono il nome di carte Karakuri (Fig. 5.26). Si tratta di carte unilaterali della misura 6,5 x 8,5 cm, con retro-magnetico e parte frontale raffigurante un'icona che rappresenta la componente tecnologica con un titolo, una breve descrizione e uno sfondo che in base al colore dà origine a una specifica codifica.

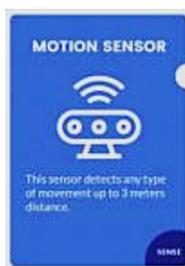


Fig. 5.26 Esempio di carta Karakuri
(Fonte: adattamento da Muñoz et al., 2020)

Mediante un approccio visuale, le carte Karakuri si propongono di accompagnare gli operatori a elaborare una soluzione IoT a un livello concettuale, a prescindere dalle competenze informatiche necessarie, per rispondere a una problematica creando un linguaggio comune e condiviso.

Per comprenderne meglio il funzionamento, si ritiene utile partire dal processo di sviluppo di una soluzione tecnologica digitale, che segue in genere la sequenza di quattro fasi mostrata in Fig. 5.27 (Muñoz et al., 2020)¹⁶⁸

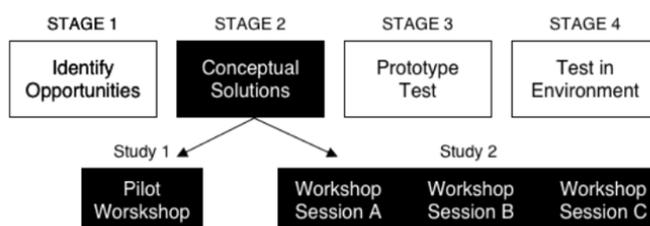


Fig. 5.27 Fasi di sviluppo per una soluzione tecnologica (Fonte: Muñoz et al., 2020)

¹⁶⁷ *Ibidem*

¹⁶⁸ *Ibidem*

Nella prima fase vengono raccolti, attraverso attività di brainstorming, i problemi e le opportunità di miglioramento individuate all'interno della fabbrica; nella seconda fase vengono ideate delle soluzioni concettuali ai problemi riscontrati nella fase precedente e selezionata quella migliore da sviluppare. Successivamente, nella terza fase si sviluppa la soluzione selezionata sotto forma di prototipo grezzo per testarne le funzionalità. Infine, se le funzionalità del prototipo soddisfano le richieste, si passa alla quarta fase di affinamento e test nell'ambiente di lavoro reale.

All'interno di questo processo di sviluppo, le carte Karakuri trovano applicazione nella fase due di sviluppo concettuale. Lo strumento ideato dai ricercatori svedesi richiede di formare team interdisciplinari di persone aventi ruoli e competenze diverse e di organizzare 4 workshop della durata massima di due ore e mezza. Nel primo Workshop Pilota, si vanno ad analizzare tutti i problemi riscontrati nella fase 1 e si arriva a creare un primo output grezzo delle carte Karakuri. Successivamente, nei Workshop A, B e C il team va ad affinare e perfezionare le carte fino ad arrivare a una soluzione da proporre per la fase di prototipazione. Nello specifico caso in esame, i ricercatori propongono questo metodo a un'azienda svedese produttrice di lavatrici, ai fini dello sviluppo di una soluzione IoT riguardante la disponibilità e il controllo dello stato di lavorazione dei cesti per il lavaggio (Muñoz et al., 2020)¹⁶⁹. Nel Workshop Pilota partecipano 2 team di 7 persone che analizzano 80 problemi derivanti dalle attività di brainstorming svolte in precedenza. In particolare, lo scopo del workshop pilota è quello di prendere consapevolezza del processo e del contesto industriale, andando a filtrare le problematiche più rilevanti al fine di comprendere quale tipo di sensori si rendono necessari per creare una soluzione concettuale al problema. Da questa attività di analisi e selezione vengono filtrate due problematiche principali relative alla disponibilità e allo stato delle macchine, che danno origine all'output del Workshop Pilota. L'output è formato da 42 carte Karakuri rappresentanti i componenti hardware necessari quali sensore di temperatura, di movimento e luminoso; queste vengono realizzate sotto forma di adesivi senza codifica di colore, da incollare su un foglio A3 (Fig. 5.28).

¹⁶⁹ Ibidem

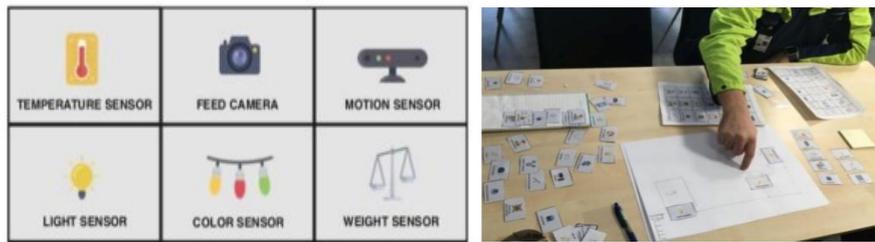


Fig. 5.28 Rappresentazione dell'output del Workshop Pilota
(Fonte: adattamento da Muñoz et al., 2020)

In questo foglio viene disegnato il layout dello stabilimento e, attraverso l'interazione e la discussione dei membri del team, viene effettuato un primo posizionamento dei sensori rappresentati dalle carte. Essendo due i team coinvolti, il Workshop Pilota porta alla realizzazione di due ipotetiche soluzioni concettuali dell'infrastruttura IoT.

Da questo primo Workshop emergono anche alcune criticità riguardo lo strumento Karakuri: i partecipanti hanno difficoltà a scegliere il tipo di sensore da posizionare poiché non hanno le conoscenze di dettaglio per conoscerne il funzionamento; inoltre, il mazzo di carte presenta solo una rappresentazione per tipo di sensore, rendendo impossibile rispondere alla necessità di posizionarne due (Muñoz et al., 2020)¹⁷⁰. Queste considerazioni vengono prese come input per il Workshop A, in cui si perfezionano le carte implementando le seguenti modifiche: eliminazione delle carte non rappresentative portandole da 42 a 27, aggiunta di una breve descrizione del sensore nella parte frontale e codifica per colore in modo da categorizzarle secondo categorie quali sensori, duplicati, indicatori luminosi e analisi (Fig. 5.29).

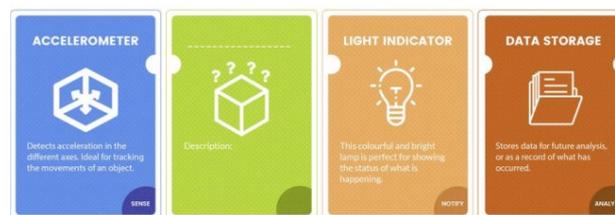


Fig. 5.29 Rappresentazione dell'output del Workshop A (Fonte: Muñoz et al., 2020)

¹⁷⁰ *Ibidem*

La discussione delle soluzioni continua successivamente nel Workshop B, in cui emerge la criticità relativa allo spazio fisico attorno al quale interagiscono i membri del team. Il tavolo inizialmente predisposto risulta inadeguato per rispondere alla necessità di appendere le carte in modo da avere una migliore gestione visuale del quadro completo. Da qui si passa al Workshop C, in cui le carte Karakuri diventano magnetiche per essere appese a una lavagna dedicata. Quest'ultima variazione rende possibile ottenere una migliore visione del layout dello stabilimento e coinvolgere attivamente le persone del team. Infatti, come si vede in Fig. 5.30, le carte maggiormente usate vengono disposte nel lato sinistro dello strumento visuale, a partire dal quale si attiva la discussione per posizionarle e collegarle con linee e frecce alle macchine nel layout di stabilimento.



Fig. 5.30 Configurazione finale delle carte Karakuri (Fonte: Muñoz et al., 2020)

La configurazione finale delle carte Karakuri porta i due team a realizzare delle soluzioni concettuali diverse dell'infrastruttura IoT, proponendo due alternative che vadano a identificare in modo automatico i telai dei cesti da lavaggio e richiamare i carri elevatori per prelevarli quando richiesto. Sono queste due proposte di soluzione, riportate in Fig. 5.31, a passare nella fase di prototipazione dove lo sviluppo tecnico del prototipo viene facilitato e velocizzato, essendo la fase concettuale già stata ampiamente sviluppata (Muñoz et al., 2020)¹⁷¹.

¹⁷¹ *Ibidem*

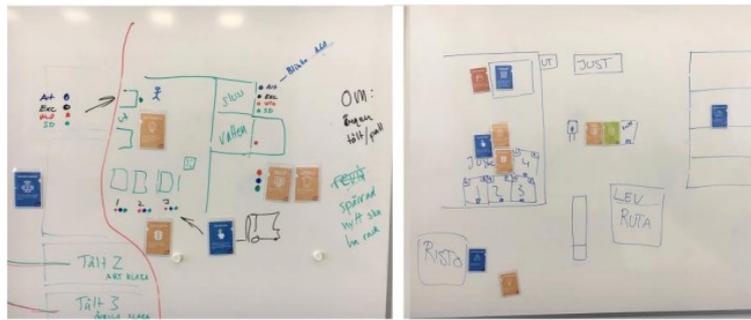


Fig. 5.31 Soluzioni finali proposte dai due team (Fonte: Muñoz et al., 2020)

Lo strumento delle carte Karakuri presentato mostra come i principi che stanno alla base dei dispositivi meccanici realizzati con l'approccio Karakuri Kaizen possano trovare applicazione anche a un livello puramente concettuale nell'ambito del problem solving. Infatti, le carte Karakuri si caratterizzano per la loro semplicità e rapidità di implementazione consentendo la creazione di un linguaggio di facile comprensione per la discussione di problemi di natura tecnica. Questo trova un interessante riscontro soprattutto nella scelta di adozione delle tecnologie digitali, dove questo strumento può rivelarsi utile in una prima fase esplorativa per analizzare e comprendere le reali necessità tecnologiche da implementare, senza dover effettuare operazioni complesse e onerose. Tutto ciò determina, in ultima analisi, l'acquisizione di una maggiore consapevolezza del processo produttivo in cui si opera e, essendo uno strumento che genera lo sviluppo di idee provenienti direttamente dal genba, contribuisce a dare un ruolo centrale alle persone aumentandone il livello di engagement.

5.7 Evidenze qualitative e quantitative emerse dai casi studio

Durante la trattazione dei 5 casi studio sono emersi numerosi aspetti, sia di carattere qualitativo che quantitativo, che in questo paragrafo finale si ritiene utile portare a fattor comune, al fine di comprendere in che modo le implementazioni secondo l'approccio Karakuri Kaizen vanno a impattare i tre ambiti di efficienza produttiva, sostenibilità e consapevolezza del modello ciclico. Come prima elaborazione, nella

Tab. 5.8 vengono descritti sotto forma di elenco i benefici che sono emersi dalle varie implementazioni di soluzioni Karakuri, quantificandoli ove presenti nelle analisi riportate dagli autori. Ai vari casi studio vengono associate anche alcune limitazioni riscontrate dopo un'analisi critica, al fine di mettere in luce possibili opportunità di miglioramento e considerazioni da tener presente per verificare l'effettiva bontà di adottare una soluzione Karakuri in grado di impattare tutti e tre gli ambiti del modello ciclico. L'ultima colonna riporta il riscontro o meno di un legame tra la soluzione Karakuri adottata e possibili tecnologie di Industria 4.0, al fine di verificare la concreta compatibilità dell'automazione a basso costo con l'innovazione digitale, sempre con riferimento ai casi analizzati.

Tab. 5.8 Elenco di benefici e limitazioni dei casi studio oggetto dell'analisi

Caso studio	Benefici	Limitazioni	Legame con tecnologie 4.0
Pogowonto e Amrina (2020)	<ul style="list-style-type: none"> - utilizzo combinato tecniche analisi processi e problem solving (Yamazumi Chart, PAM, 4M) - eliminazione 2 NVA - riduzione tempo ciclo (4 s) - aumento indice di flusso (+2%) - meccanismo di ritorno a basso costo - nessun consumo energia elettrica 	<ul style="list-style-type: none"> - nessun margine sicurezza del tempo ciclo rispetto al Takt Time - permanenza attività NVA (13 s) - mancata quantificazione costi di implementazione - mancata quantificazione risparmio energetico 	Assente
Chang e Lai (2022)	<ul style="list-style-type: none"> - riduzione movimentazioni e scorte - liberazione manodopera (3 operatori) - miglioramento ergonomia - sostituzione contenitori plastica con cartoni - rack di flusso a basso costo - basso consumo energia elettrica 	<ul style="list-style-type: none"> - mancata quantificazione efficienza (VSM qualitativa senza IF) - mancata quantificazione grado di miglioramento ergonomico - permanenza attività NVA (sblocco manuale cartoni) - mancata quantificazione costi di implementazione - mancata quantificazione risparmio energetico - nessun riscontro su grado coinvolgimento operatori 	Integrazione con sensori e AGV
Özcan (2022)	<ul style="list-style-type: none"> - utilizzo tecniche osservazione diretta e misurazione (REBA) - miglioramento Score REBA (da 8 a 3 punti) - aumento efficienza (+17%) - riduzione frequenza trasporto (-33%) - nessun consumo energia elettrica - sistema sollevamento a basso costo 	<ul style="list-style-type: none"> - scarso dettaglio sequenza produttiva - mancata quantificazione costi di implementazione - mancata quantificazione risparmio energetico - nessun riscontro su grado coinvolgimento operatori 	Assente

Anggrahini et al. (2020)	<ul style="list-style-type: none"> - riduzione del tempo ciclo (-39%) - riduzione Lead Time (-54 min) - aumento capacità produttiva (+6 unità) - risparmio energia elettrica (-45%) - aumento sicurezza operatore 	<ul style="list-style-type: none"> - nessuna analisi bilanciamento carichi lavoro operatori - mancata quantificazione costi di implementazione - nessun riscontro su grado coinvolgimento operatori 	Integrazione con sensori
Muñoz et al. (2020)	<ul style="list-style-type: none"> - aumento consapevolezza e conoscenza dei processi - coinvolgimento operatori per discussione problemi tecnici (no manodopera specializzata) - diminuzione tempo di prototipazione 	<ul style="list-style-type: none"> - mancata quantificazione efficientamento tempo prototipazione - mancata quantificazione costi di implementazione - mancata quantificazione risparmio energetico 	Propedeuticità con IoT

Rispetto ai benefici, nei casi studio di Pogowonto e Amrina (2020), Özcan (2022) e Anggrahini et al. (2020), in cui sono state adottate tecniche di analisi basate sull'approccio scientifico, si ottengono dei miglioramenti quantificati e oggettivi nelle prestazioni dei processi dallo stato iniziale a quello futuro ottimizzato. L'impatto risulta significativo in particolare sui seguenti parametri:

- aumento dell'efficienza produttiva, con una riduzione del tempo ciclo del 2% nel primo caso, 17% nel secondo e 39% nell'ultimo;
- miglioramento del livello di ergonomia, misurato in termini di riduzione dello Score REBA di 5 punti nel secondo caso;
- riduzione del consumo energetico, pari al 45% nell'ultimo caso.

È interessante notare come, a fronte di un'ottimizzazione dell'efficienza produttiva, si ottiene un impatto positivo anche su alcuni parametri di sostenibilità; mentre non si rilevano elementi oggettivi che misurino il grado di coinvolgimento degli operatori.

Negli altri due casi studio di Chang e Lai (2022) e Muñoz et al. (2020), i benefici emersi dall'adozione della soluzione Karakuri sono riportati nei diversi ambiti a un livello puramente qualitativo, che tuttavia non consente un'effettiva comparazione tra la situazione attuale e quella ottimizzata.

In generale, dalle misurazioni risulta evidente che alla componente dell'efficienza produttiva viene assegnato un peso maggiore, essendo la produttività l'obiettivo principale perseguito dalle aziende che adottano l'automazione per esigenze legate

a un aumento della capacità produttiva. Nonostante le potenzialità offerte dalle soluzioni Karakuri anche nell'ambito dell'ergonomia e dell'efficientamento energetico, la mancanza di misurazioni fa presupporre che la sostenibilità non sia la motivazione principale che guida le aziende nelle scelte di automazione a basso costo. Nella Tab. 5.8, infatti, sono evidenziate per tutti i casi studio delle limitazioni per quanto riguarda la quantificazione dei seguenti aspetti:

- costi di implementazione
- riduzione dell'impatto energetico, salvo nel caso studio di Anggrahini et al. (2020)
- miglioramento del livello di coinvolgimento degli operatori.

Queste sono le considerazioni che verranno ulteriormente sviluppate nel proseguo del paragrafo mediante lo sviluppo di una cross-case analysis al fine di portare a all'interno delle aree del modello ciclico le evidenze empiriche emerse dai casi studio.

Analizzando l'ultima colonna della Tab. 5.8 si vuole entrare prima nel dettaglio del legame tra le soluzioni Karakuri proposte e le tecnologie digitali. Come si può notare, in 2 dei 5 casi viene proposta un'integrazione con i sensori, in un caso anche con i mezzi AGV, per consentire al meccanismo Karakuri un funzionamento più efficace e adattabile al contesto industriale moderno. Nell'ultimo caso studio, questo legame è presente a un livello concettuale per supportare l'adozione di una tecnologia IoT. Infine, gli altri 2 dei 5 casi non presentano alcun legame essendo l'automazione realizzata esclusivamente sfruttando i principi fisici elementari. Si può dunque constatare che l'approccio Karakuri Kaizen offre una metodologia flessibile e adattabile per implementare un'automazione sia nei contesti produttivi e logistici moderni altamente tecnologici, come evidenzia il legame con sensori e AGV, che in quelli dove il livello di digitalizzazione non è altrettanto sviluppato, testimoniato da un'assenza di legame. Una sintesi di queste considerazioni è rappresentata in Fig. 5.32.

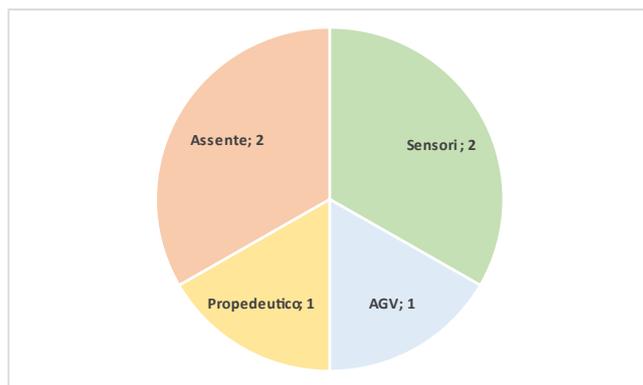


Fig. 5.32 Tipologia e quantificazione del legame tra soluzioni Karakuri e tecnologie 4.0

Riprendendo l'analisi con riferimento ai benefici e alle limitazioni presentate nella Tab. 5.8, si intende a questo punto sviluppare un ulteriore approfondimento delle evidenze empiriche, al fine di ricondurre tutti gli elementi raccolti sotto un'unica lente all'interno del modello teorico ciclico. Per fare ciò, si è adottato un criterio oggettivo basato sull'effettiva quantificazione della relazione tra i parametri di miglioramento delle prestazioni all'interno dei cinque casi studio e gli ambiti di efficienza produttiva, sostenibilità e coinvolgimento. Come anticipato, in alcuni casi è stato riportato l'effetto dell'implementazione dei dispositivi Karakuri in termini di benefici numerici o percentuali, come variazione delle performance nel passaggio dalla situazione attuale a quella ottimizzata; per altri non è stato riscontrato l'elemento quantitativo all'interno della trattazione da parte degli autori, pertanto si reputa possa esserci una limitazione in merito a questo aspetto.

Poiché la componente quantitativa è ritenuta più significativa rispetto a quella qualitativa in una scelta di adozione di soluzioni Karakuri, per discriminare la natura della relazione si è adottato il seguente criterio per ciascuna area: assegnazione di un "+" qualora il caso preveda una quantificazione numerica e oggettiva dei benefici ottenuti mediante la soluzione Karakuri; segno "+-" nel caso in cui i benefici vengano discussi ma non quantificati; infine, segno "-" in mancanza di discussione e quantificazione dei benefici. Quello che emerge da questo passaggio viene riportato in Tab. 5.9, che rappresenta le relazioni assegnate alle soluzioni Karakuri emerse dai 5 casi studio.

Tab. 5.9 Rilevazione della presenza di una componente quantitativa dei benefici

Fonte	Soluzione Karakuri	Efficienza produttiva (riduzione sprechi, stabilità domanda, bilanciamento carichi lavoro)	Sostenibilità (economica, sociale, ambientale)	Consapevolezza (pensiero critico, problem solving creativo, team)
Pogowonto e Amrina (2020)	Meccanismo di andata/ritorno maschera cuscinetti basamento motore	+	+ -	+ -
Chang e Lai (2022)	Rack di flusso e sistema di rilascio laterale	+ -	+ -	-
Özcan (2022)	Carrello di sollevamento contenitori	+	+	-
Anggrahini et al. (2020)	Trasportatore a rulli inclinato	+	+	-
Muñoz et al. (2020)	Schede di progettazione modulari	-	-	+ -

“+”: quantificato; “+ -”: quantificato ma non discusso; “-”: non quantificato e non discusso

Successivamente, si è assunto un criterio per l’elaborazione delle rilevazioni raccolte, che sia in grado di dare un peso numerico per ciascuna delle tre aree del modello. È stato assegnato un punteggio pari a 1 in presenza della relazione “quantificato”; pari a 0,5 per la relazione “quantificato ma non discusso”; infine, pari a 0 quando “non quantificato e non discusso”. Ne risulta un punteggio pari a 3,5 punti su 5 per l’ambito dell’efficienza produttiva, ovvero più della metà dei casi offre una quantificazione dei benefici; la sostenibilità ottiene un punteggio pari a 3 punti su 5, dimostrando un discreto livello di analisi; mentre nettamente inferiore si rivela l’ambito della consapevolezza con un punteggio pari a 1 punto su 5, essendo discussa solamente in due casi ma non quantificata. Il risultato di queste rilevazioni va a rafforzare ulteriormente le considerazioni esposte all’inizio del paragrafo in riferimento ai benefici e alle limitazioni dei 5 casi studio.

Come passaggio conclusivo, è stata svolta una cross-case analysis. Per ogni colonna della Tab. 5.9 si è determinata la presenza delle tre relazioni nei diversi casi studio, che poi è stata convertita in percentuale per comprendere quale componente influisce maggiormente sui tre ambiti del modello ciclico. I risultati vengono riportati nel grafico a colonne in pila con percentuale, rappresentato in Fig. 5.33.

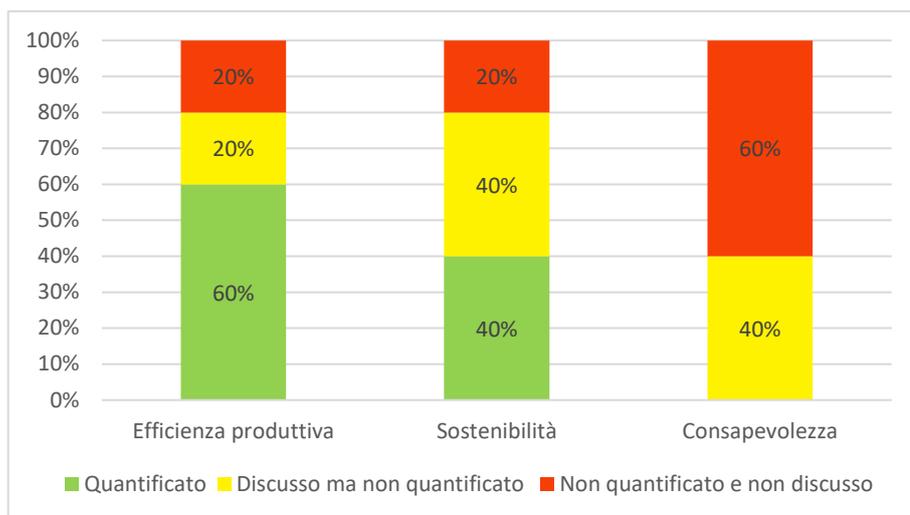


Fig. 5.33 Comparazione del livello di quantificazione dei benefici nei tre ambiti

Il grafico mostra una barra per ogni ambito del modello ciclico (Efficienza produttiva, Sostenibilità, Consapevolezza) con una proporzione delle 3 tipologie di relazione (Quantificato, Discusso ma non quantificato, Non quantificato e non discusso). Quello che emerge è una maggiore quantificazione totale dei benefici nell'ambito dell'efficienza produttiva (60%), che risulta essere quello a cui le aziende attribuiscono più importanza nelle scelte di automazione. Questo risultato può essere attribuibile anche a un fattore di semplicità nella misurazione dei parametri di efficienza essendo le aziende già abituate a monitorare dei KPI quali tempo ciclo e tempo di attraversamento. Per quanto riguarda la sostenibilità si nota un effetto tangibile delle automazioni realizzate con i principi Karakuri Kaizen, pur avendo meno riscontro nella parte quantitativa. Infatti, sul totale dei casi studio, sono due (40%) quelli che presentano misure effettive di miglioramento su parametri di ergonomia e/o efficientamento energetico, mentre altri due (40%) discutono dei benefici senza entrare nel merito dei dati numerici a supporto. Nell'ambito della consapevolezza si nota come ancora le aziende non siano arrivate a definire dei parametri oggettivi per quantificare i benefici nell'adozione dell'approccio Karakuri Kaizen e, quindi, ottenere una conoscenza approfondita dei processi e il coinvolgimento degli operatori. Sono soltanto due (40%) i casi in cui viene data rilevanza a questo aspetto pur non quantificandolo, mentre gli altri tre (60%) non prendono in considerazione le dinamiche trasversali. Ciò si attribuisce in primis al fatto che la misurazione di questi parametri è di difficile attuazione;

altre motivazioni potrebbero essere attribuite alla struttura organizzativa che non abilita in maniera strutturata il coinvolgimento degli operatori o alla difficoltà di sfruttare il know-how interno nel processo di scelta e sviluppo delle soluzioni di automazione.

In conclusione, si può constatare che l'automazione a basso costo realizzata mediante l'approccio Karakuri Kaizen impatta in maniera significativa l'ambito dell'efficienza produttiva e, nelle scelte di progettazione e attuazione, pone particolare attenzione alle tematiche di sostenibilità. Sull'ambito della consapevolezza non vi è un'evidenza quantificata e, pertanto, esistono opportunità di miglioramento per rilevare l'impatto positivo delle soluzioni Karakuri anche nel livello di engagement. Si ritiene opportuno mettere in evidenza che queste conclusioni sono state tratte dall'analisi del numero limitato di casi studio a disposizione e, per consolidare ulteriormente i risultati, si rende opportuno arricchire la cross-case analysis con altre evidenze empiriche.

In aggiunta, si ritiene che la mancanza di una quantificazione oggettiva della convenienza economica nell'adozione di questa tipologia di automazione sia una limitazione particolarmente importante, poiché dall'evidenza empirica non si è potuto cogliere il beneficio legato ai bassi costi di implementazione.

L'insieme di questi elementi può rappresentare fonte di ulteriori sviluppi per rafforzare i vantaggi della scelta di un'automazione a basso costo rispetto a quella tradizionale. In altre parole, ulteriori ricerche possono supportare il riscontro quantitativo degli ambiti che non è stato possibile rilevare fino a questo momento, andando nella direzione di considerare il Karakuri Kaizen nella sua concezione originaria, ovvero come un metodo di automazione appartenente al filone del Lean Management che, come tale, mette sullo stesso piano i temi della riduzione degli sprechi, della sostenibilità e della centralità delle persone.

Conclusione

Questo elaborato fa emergere come nel periodo attuale le aziende operanti nel panorama industriale siano chiamate a considerare non solo esclusivamente il contesto produttivo ed economico, bensì anche quello sociale e ambientale in cui sono inserite. Il mondo industriale sta attraversando una fase di trasformazione, pur rimanendo all'interno dei confini della Quarta Rivoluzione Industriale, verso il paradigma di Industria 5.0. La prospettiva dello sviluppo tecnologico, per garantire il raggiungimento degli obiettivi di efficacia ed efficienza, deve necessariamente spostare il focus dall'assoluta priorità alla centralità del dato verso l'importanza rivestita dalla centralità delle persone e dal rispetto per l'ambiente che le circonda. La trasformazione in atto ha particolari ripercussioni sulle modalità di concepire i sistemi di automazione all'interno delle fabbriche, dove il perseguimento della massima efficienza produttiva rappresenta una condizione necessaria ma non più sufficiente. Infatti, la crescente attenzione verso gli aspetti sociali e ambientali evidenzia la necessità di pensare a metodi di automazione alternativi o di supporto a quelli tradizionali, altamente automatizzati e caratteristici di Industria 4.0.

Lo sviluppo di questo elaborato illustra una strategia di automazione che unisce i tratti di flessibilità e modularità caratteristici dell'automazione tipica di Industria 4.0 ai principi cardine di umano-centrismo, resilienza e sostenibilità proposti dal paradigma di Industria 5.0. Nel fare ciò, fa emergere come all'interno delle metodologie di automazione Low-Cost Automation (LCA) del Lean Management esista uno strumento in grado di automatizzare i processi produttivi e logistici in maniera efficiente e sostenibile, ponendo al centro dell'attenzione il ruolo degli operatori. Questi sono i presupposti e gli elementi riscontrati nell'ambito del Karakuri Kaizen, un approccio con origini centenarie che consente di risolvere i problemi operativi caratteristici degli ambienti di fabbrica in maniera semplice, attraverso soluzioni di automazione a basso costo. Nell'analisi costi-benefici tra alta automazione e automazione a basso costo, si evidenzia una maggiore convenienza di quest'ultima fintanto che il livello di riduzione dei costi è maggiore del minor grado di controllo dei processi che risulta essere in grado di garantire.

Al fine di dimostrare gli impatti multipli che può avere l'approccio del Karakuri Kaizen, la ricerca bibliografica effettuata nel database scientifico Google Scholar, partendo da una base di 1850 pubblicazioni ottenute con la parola chiave "Karakuri" dal 1994 al 2023, ha condotto a 12 pubblicazioni significative, restringendo il campo di ricerca, attraverso un criterio di completezza e quantificazione dei dati e delle informazioni, alle parole chiave "Karakuri + Kaizen + Industry 4.0 + Sustainability" nelle pubblicazioni che vanno dal 2017 al 2023. Tra le 12 selezionate, si ritengono particolarmente rilevanti ai fini della trattazione dei risultati ottenuti le seguenti 3 pubblicazioni:

- Bertagnolli F., 2022, *Lean Management Introduction and In-Depth Study of Japanese Management Philosophy*, Springer, Pforzheim.
- Bhanu P. V., Kumar B. S., 2018, *Global study and implementation of Karakuri Investigation into the applications of Karakuri and its integration with emerging technologies*, *Master's thesis in Production Engineering, Chalmers University Of Technology*, Gothenburg.
- Kostrzewski M., Nowak W. J., 2022, *Karakuri solutions and Industry 4.0*, *Handbook of Smart Materials, Technologies and Devices: Application of Industry 4.0*, vol. 4, pp. 69-97.

Dall'analisi della letteratura emerge come i dispositivi di automazione realizzati attraverso l'approccio Karakuri Kaizen (rack di flusso, sistemi di sollevamento verticale, trasportatori a rulli) si basano su principi di funzionamento ed elementi costitutivi di base di semplice utilizzo e implementazione. Questi richiedono costi di investimento iniziale e operativi inferiori rispetto alle automazioni tradizionali e, soprattutto, non necessitano dell'uso di energia elettrica. Inoltre, la loro implementazione mette l'operatore al centro del processo di sviluppo interno dell'automazione, considerando fondamentali gli aspetti di ergonomia, benessere e sicurezza, secondo cui l'automazione viene vista a supporto della persona e non viceversa.

Questi aspetti hanno portato alla realizzazione di un modello teorico ciclico che mette in risalto le 3 aree in cui si rilevano benefici dall'automazione mediante l'approccio Karakuri Kaizen:

1. efficienza produttiva: ottimizza i processi riducendo gli sprechi in particolare di movimentazione, trasporto e scorte nella gestione dei materiali;
2. consapevolezza: stimola il pensiero critico e una conoscenza approfondita dei principi di funzionamento dei processi interni;
3. Sostenibilità: abbassa le barriere d'ingresso all'automazione, creando un ambiente di lavoro ergonomico, inclusivo e a ridotto impatto ambientale.

Le tre aree su cui va ad agire l'approccio Karakuri Kaizen sono tra loro interconnesse mediante una prospettiva ciclica, che crea una tensione al miglioramento continuo secondo il 5° principio fondamentale del Lean Thinking. Infatti, la realizzazione di questi dispositivi in grado di generare efficienza produttiva attraverso l'automazione avviene grazie al coinvolgimento e alla consapevolezza degli operatori nel metodo Karakuri e nei processi in cui operano. Questa consapevolezza porta a una maggiore sensibilità verso le tematiche di sostenibilità, che innescano un nuovo miglioramento dell'efficienza, riprendendo il ciclo del miglioramento continuo.

A fronte di questi importanti benefici emersi dall'approccio Karakuri Kaizen, la scelta di analizzare nel dettaglio i 5 casi studio rappresentativi emersi dalle pubblicazioni selezionate ha portato alla rilevazione di evidenze qualitative e alla presenza di dati quantitativi che testimoniano l'impatto delle soluzioni Karakuri nelle 3 aree del modello ciclico. Il risultato dell'analisi mette in rilievo alcuni dati interessanti: nei casi analizzati viene quantificato nella misura significativa del 60% l'ambito che interessa l'efficienza produttiva e nella misura del 40% quello della sostenibilità; non risultano invece evidenze quantitative oggettive per quanto riguarda l'ambito della consapevolezza. È importante evidenziare che i benefici sono più facilmente misurabili per quanto riguarda l'efficienza e la sostenibilità, mentre non è altrettanto semplice individuare indicatori appropriati nella sfera della consapevolezza. In ogni caso, nelle tematiche sia della sostenibilità che della consapevolezza si rileva una componente pari al 40% di casi in cui i benefici vengono trattati e discussi, pur mancando l'oggettività del dato, il che testimonia l'importanza crescente nei confronti delle due tematiche. Tuttavia, nell'area della consapevolezza emerge in modo rilevante, nella misura del 60%, l'assenza di

valutazione relativa all'impatto, come segnale che si rendono necessari ulteriori approfondimenti.

A fronte dell'ampio ventaglio di aspetti portati alla luce in questo elaborato, emerge come l'approccio Karakuri Kaizen rappresenta una tipologia di automazione che ben si adatta al contesto di Industria 5.0 in quanto le sue proprietà e caratteristiche rispecchiano i 3 principi cardine:

- umano-centrica: sviluppa l'automazione a supporto dell'operatore, mettendone al centro il potere decisionale critico e il benessere lavorativo;
- resiliente: fonda i suoi meccanismi su principi e processi affidabili e robusti e si autosostiene essendo indipendente da fonti energetiche esterne;
- sostenibile: comporta ridotti costi iniziali e di esercizio e crea un ambiente di lavoro ergonomico e inclusivo favorendo anche, attraverso un basso impatto energetico, il processo di decarbonizzazione.

In sintesi, questo elaborato ha evidenziato come l'automazione Karakuri, grazie alle sue caratteristiche, rappresenta un metodo alternativo per implementare l'automazione all'interno dei processi produttivi e logistici attraverso la realizzazione di soluzioni su misura calate all'interno del contesto aziendale. La sua semplicità e i ridotti costi d'accesso rappresentano una tangibile opportunità per le PMI che vogliono accedere ai sistemi di automazione, altrimenti non realizzabili a causa degli elevati costi d'investimento tipici dell'alta automazione. In altre parole, le soluzioni Karakuri abilitano nuovi modelli di business e opportunità di miglioramento dei processi. Per le grandi imprese, invece, questo tipo di automazione può trovare implementazione in una fase precedente l'adozione di un'alta automazione, consentendo una maggiore comprensione dei processi e della reale esigenza di digitalizzazione senza esporsi economicamente e operativamente, oppure in una modalità ibrida di integrazione con le tecnologie 4.0 già adottate al fine di aumentarne l'efficacia.

In ultima analisi, è emerso in modo altrettanto rilevante come a fianco degli impatti positivi riscontrati siano rilevabili anche aspetti limitanti la diffusione dell'automazione Karakuri, rappresentati in particolare dalla componente organizzativa e culturale delle imprese. Infatti, un'efficace implementazione

dell'automazione Karakuri richiede un'organizzazione aziendale orientata in modo strutturale all'approccio Lean. Inoltre, gli aspetti di semplicità ed economicità portano a un generale scetticismo verso questo approccio, che determina una mancanza di consapevolezza riguardo le potenzialità dell'automazione Lean a basso costo. Tutto questo fa spesso indirizzare le scelte verso soluzioni di alta automazione, in caso di disponibilità di capitali, oppure come accade nelle PMI genera un abbandono precoce della sperimentazione di tale metodo in favore del mantenimento di processi manuali meno efficienti.

È proprio quest'ultimo passaggio che si ritiene possa costituire la base per eventuali sviluppi futuri, che vadano nella direzione di potenziare la misurazione e quantificazione dei benefici attraverso appositi indicatori di prestazione, specie nell'area della consapevolezza dove si è verificata l'assenza di dati oggettivi a supporto. Infatti, si ritiene che qualora anche la componente trasversale fosse ulteriormente approfondita e supportata, questo consentirebbe un maggior sviluppo e una migliore considerazione delle soluzioni Karakuri all'interno delle organizzazioni, venendo visto pienamente come un metodo efficiente e sostenibile per implementare l'automazione.

Bibliografia

Anggrahini D., Prasetyawan Y., Diartiwi S. I., 2020, Increasing Production Efficiency using Karakuri Principle (A Case Study in Small and Medium Enterprise), *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 852.

Ansari I. A., Bajaj V., 2023, IoT for Industry 4.0: performance monitoring in manual production, *Advanced Signal Processing for Industry 4.0*, vol. 2, n. 1, IOP Publishing.

Bahrin M.A.K., Othman M.F., Azli N.H.N., Talib M.F., 2016, Industry 4.0: A review on Industrial Automation and Robotic, *Jurnal Teknologi*, vol.78, n 13, pp. 137-143.

Bertagnolli F., 2022, Lean Management Introduction and In-Depth Study of Japanese Management Philosophy, *Springer*, Pforzheim.

Bhanu P. V., Kumar B. S., 2018, Global study and implementation of Karakuri Investigation into the applications of Karakuri and its integration with emerging technologies, *Master's thesis in Production Engineering, Chalmers University Of Technology*, Gothenburg.

Cappelozza F., Dal Pozzo G., 2023, L'industria per la società 5.0 – Verso una società Umano-centrica, Sostenibile e Resiliente, *MIT Sloan Management Review Italia*, n. 3, pp. 4-13.

Chang A., Lai P., 2022, Promoting the Application of Lean Automation - Take the Automobile Oil Seal Manufacturing Industry as an Example, *IEEE 4th Eurasia Conference on IoT, Communication and Engineering*, pp. 541-546.

Chang A., Lai P., 2023, Promoting the Application of Lean Automation - Take the Automobile Oil Seal Manufacturing Industry as an Example, *IEEE 5th Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering*, pp. 948-951.

Dieste M., Panizzolo R., 2018, On the Relationship between Lean Practices and Environmental Performance, *9th International Conference on Environmental Science and Development*, IOP Publishing.

Dilanthi M.G.S., 2015, Conceptual Evolution of Lean Manufacturing, *International Journal of Economics, Commerce and Management*, vol. III, n. 10, pp. 574-585.

Erboz G., 2017, How to Define Industry 4.0: The Main Pillars Of Industry 4.0, *Managerial Trends in the development of enterprises in Globalization Era*, pp. 761-767.

Golovianko A. M., Terziyan V. B., Branytskyi V. A., Malyk D., 2023, Industry 4.0 vs. Industry 5.0: Co-existence, Transition, or a Hybrid, *4th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing*.

Hassoun A. et al., 2022, The fourth industrial revolution in the food industry-Part I: Industry 4.0 technologies, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 63, n. 23, pp. 6547-656.

Katayama H., Sawa K., Hwang R., Ishiwatari N., Hayashi N., 2014, Analysis and Classification of Karakuri Technologies for Reinforcement of their Visibility, Improvement and Transferability: An Attempt for Enhancing Lean Management, *Proceedings of PICMET '14: Infrastructure and Service Integration*, pp. 1895-1906.

Kehr T.W., Proctor M.D., 2017, People pillars: re-structuring the Toyota Production System (TPS) house based on inadequacies revealed during the automotive recall crisis, *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 33, pp. 921–930.

Kemper H., Fettke P., Feld T., Hoffmann M., 2014, Industry 4.0, *Business & Information Systems Engineering*, vol.4, pp. 239-242.

Khuzaini., Irpan M., Shaddiq S., 2024, Industry 4.0 and Industry 5.0 - Inception, Conception, Perception, and Rethinking Loyalty Employment, *International Journal Of Economics, Management, Business and Social Science*, vol. 4, n. 1, pp. 95–114.

Kolberg D., Zühlke D., 2015, Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, n. 3, pp. 1870-1875.

- Kostrzewski M., Nowak W. J., 2022, Karakuri solutions and Industry 4.0, *Handbook of Smart Materials, Technologies and Devices: Application of Industry 4.0*, vol. 4, pp. 69-97, Springer.
- Krafcik J. F., 1988, Triumph Of The Lean Production System, *Sloan Management Review*, vol. 30, n. 1, pp. 41.
- Kumar A., Kumar S., 2020, Industry 4.0: Evolution, Opportunities and Challenges, *International Journal of Research in Business Studies*, vol. 5, n.1, pp. 2455-2992.
- Muñoz A. A., Florin U., Eriksson Y., Yamamoto Y., Sandström K., 2020, The Karakuri Card Deck: Co-Designing Industrial Iot Conceptual Solutions, *International Design Conference*, Svezia.
- Naciri L., Mouhib Z., Gallab M., Nali M., Abbou R., Kebe A., 2022, Lean and Industry 4.0: A leading harmony, *3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing*, Rabat, Marocco.
- Özcan A. G., 2022, Application Of Reba And Karakuri Kaizen Techniques To Reduce Ergonomic Risk Levels In A Workplace, *Journal of Engineering Sciences and Design*, vol. 10, n. 4, pp. 1430 – 1444.
- Panizzolo R., 2022, Slide delle lezioni, *Insegnamento di Gestione Snella dei Processi, Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale*, Università degli Studi di Padova, A.A. 2022/2023.
- Pereira A.C., Romero F., 2017, A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept, *Manufacturing Engineering Society International Conference*, Vigo, Spagna.
- Pogowonto A., Amrina U., 2020, Reduction of Cycle Time in Vehicle Engine Assembly Line Using Karakuri Kaizen, *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology (IJERAT)*, vol.6, n. 10, pp. 49-67.
- Prasetyawan Y., Agustin A. A., Anggrahini D., 2020, Simple Automation For Pineapple Processing Combining With Karakuri Design, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 852.

Reddy C.K.K., Anisha P.R., Khan S., Hanafiah M.M., Pamulaparty L., Mohana R.M., 2024, *Sustainability in Industry 5.0*, CRC Press, Florida.

Rosin F., Forget P., Lamouri S., Pellerin R., 2020, Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles, *International Journal of Production Research*, vol. 58, n. 6, pp. 1644-1661.

Sugimori Y., Kusunoki K., Cho F., Uchikawa S., 1977, Toyota production system and Kanban system Materialization of just-in-time and respect-for-human system, *International Journal of Production Research*, vol. 15, n. 6, pp. 553-564.

Tan H. K., Katayama H., Manickavasagam S., 2023, What is Karakuri Kaizen and Hoe Does it Work?, *Proceedings of the 11th International Conference on Production Research-Americas*, pp. 25-32.

Tortorella G., Sawhney R., Jurburg D., Carisio de Paula I., Tlapa D., Thurer M., 2021, Towards the proposition of a Lean Automation framework Integrating Industry 4.0 into Lean Production, *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 32, n. 3, pp. 593-620.

Walentynowicz P., Pienkowski M., 2021, Application of Industry 4.0 Technologies to Support Lean Companies, *International Business Information Management Association*, pp. 17414-17423.

Womack J.P., Jones D.T., 1997, Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation, *Journal of the Operational Research Society*, vol. 48, n. 11.

Sitografia

Beewatec, www.beewatec.com/lean-solutions/karakuri

Considi, www.considi.it/industria-4-0

Considi, www.considi.it/lean-management

Considi, www.considi.it/lean-organization

Considi, www.considi.it/lean-thinking

Item, www.item24us.online/solution-center

JIPM, www.jipm-event.com/karakuri