

**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Tecnica e Gestione dei Sistemi

Industriali DTG

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale

**Confronto dell'effetto del learning nelle linee
di assemblaggio con operatori fissi e
operatori mobili**

Relatore:

Chiar.ma Ing. Ilenia Zennaro

Laureando:

Riccardo Dalla Costa

Anno Accademico 2023/2024

*Alla mia famiglia che ha reso possibile tutto questo e
insegnato cosa significhi il sacrificio.*

A Matilde che mi ha dato la forza di cui avevo bisogno.

*A Luky che, con la sua indifferenza, ha contribuito
al raggiungimento di questo traguardo.*

*A tutti coloro che hanno sempre creduto in me,
fin dal primo giorno, forse anche più di quanto facessi io.*

A me stesso, ad ogni mio successo.

SOMMARIO

Sebbene oggigiorno si cerchi aumentare il livello di automazione in molti sistemi produttivi, la componente umana rimane fondamentale per l'industria dell'assemblaggio. In questo contesto esistono diverse configurazioni di sistemi di montaggio, che si differenziano per layout e per strategie legate agli operatori. I più noti sono i sistemi a operatori fissi (fixed workers - FW) i quali sono principalmente caratterizzati da ridotti tempi di ciclo se la produttività corrisponde a quella target, e a operatori mobili (walking workers - WW) i quali sono sistemi più robusti rispetto alla variazione della domanda di mercato. Queste due soluzioni hanno due obiettivi differenti: le fixed worker vogliono ridurre i tempi di svolgimento dei task di ogni singola stazione, i walking worker vogliono diminuire il tempo complessivo che ogni operatore impiega per eseguire tutti i compiti. La necessità di modellizzare due configurazioni differenti nasce dal fatto che il mercato richiede sistemi sempre più flessibili, che facciano tanti prodotti diversi e con volumi molto variabili. In tale contesto l'effetto del learning influisce sicuramente sulla produttività dei sistemi, infatti la sostituzione di un operaio esperto con uno inesperto, si traduce con una curva di apprendimento per il nuovo lavoratore, il quale comincerà a lavorare più lentamente, inficiando negativamente sulla produttività dell'azienda. L'obiettivo principale della tesi è quello di capire quale soluzione sia la più efficace in contesti di produttività variabili, dopo aver evidenziato l'importanza della learning curve e le caratteristiche di queste due configurazioni usate nelle linee di assemblaggio.

La struttura dell'elaborato è articolata nel seguente modo:

Capitolo primo: presenta in prima battuta l'evoluzione della domanda di mercato e la classificazione delle linee di assemblaggio; invece, la seconda parte della trattazione si sofferma su tre aspetti molto importanti: il primo è legato al concetto di flessibilità, mentre gli altri due sono tecniche tutt'oggi utilizzate per incrementare la velocità di risposta alla domanda di mercato.

Capitolo secondo: contiene la trattazione delle configurazioni più utilizzate nelle linee di assemblaggio con operatori fissi e con operatori mobili. In

questa sezione dell'elaborato, le due soluzioni vengono messe a confronto andandone a determinare i rispettivi vantaggi e svantaggi.

Capitolo terzo: approfondisce il fenomeno dell'apprendimento il quale viene descritto attraverso l'implementazione di curve di apprendimento (o learning curve-LC). Conoscere le LC per ciascun operatore è necessario perché consente all'azienda di riuscire ad assegnare ad ogni dipendente una mansione di difficoltà proporzionale alle sue capacità.

Capitolo quarto: si sofferma inizialmente sulla modellizzazione matematica dell'effetto del learning. Successivamente viene presentato un caso applicativo, il quale mette a confronto le linee di assemblaggio a operatori fissi e mobili facendo variare i volumi di produzione. Viene infatti dimostrato come la convenienza della scelta della configurazione della linea di assemblaggio varia, anche in base al parametro utilizzato per il confronto.

Indice

INTRODUZIONE	11
1 LINEE DI ASSEMBLAGGIO	13
1.1 EVOLUZIONE DELLE LINEE DI ASSEMBLAGGIO E DELLA DOMANDA DI MERCATO.....	13
1.2 CLASSIFICAZIONE DELLE LINEE DI ASSEMBLAGGIO	14
1.2.1 <i>Layout</i>	15
1.2.2 <i>Varietà prodotti</i>	17
1.2.3 <i>Ritmo di produzione</i>	18
1.3 FLESSIBILITÀ.....	19
1.4 SMED (SINGLE MINUTE EXCHANGE DIE)	21
1.5 MODULARITÀ.....	22
2 LINEE DI ASSEMBLAGGIO CON OPERATORI FISSI (FW) E MOBILI (WW)	25
2.1 FIXED WORKER (FW)	25
2.1.1 <i>Vantaggi e svantaggi del sistema Fixed Worker</i>	26
2.2 WALKING WORKER (WW)	27
2.2.1 <i>Tipologie di linee Walking Worker</i>	28
2.2.2 <i>Vantaggi e svantaggi del sistema Walking Worker</i>	31
2.3 CONFRONTO TRA FW E WW	32
3 CURVA DI APPRENDIMENTO	35
3.1 CURVA DI APPRENDIMENTO: MODELLO DI WRIGHT.....	36
3.1.1 <i>Limiti del modello di Wright</i>	39
3.2 CURVA DI DIMENTICANZA.....	40
3.2.1 <i>Modello di curva di apprendimento-dimenticanza (LFCM)</i>	40
3.2.2 <i>Modello a regressione variabile a dimenticanza invariante (VRIF) e variabile (VRVF)</i>	42
3.3 CONCLUSIONI FINALI	43
4 CASO APPLICATIVO	45
4.1 MODELLO MATEMATICO: EFFETTO DEL LEARNING.....	45
4.2 CASO APPLICATIVO: DATI.....	47

<i>4.2.1 Bilanciamenti</i>	49
<i>4.2.2 Parametri usati per la risoluzione del caso applicativo</i>	52
4.3 CASO APPLICATIVO: ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI.....	55
CONCLUSIONI	59
BIBLIOGRAFIA	61

Indice delle figure

FIGURA 1: ESEMPIO DI DIAGRAMMA DELLE PRECEDENZE	14
FIGURA 2: LAYOUT RETTILINEO	15
FIGURA 3: LAYOUT RETTILINEO CON PARALLELO SEMPLICE	15
FIGURA 4: LAYOUT A FORMA DI U	16
FIGURA 5: LAYOUT CONVERGENTE	16
FIGURA 6: LINEA SINGLE-MODEL	17
FIGURA 7: LINEA MULTI-MODEL.....	17
FIGURA 8: LINEA MIXED-MODEL	18
FIGURA 9: LINEA DI ASSEMBLAGGIO CON CONFIGURAZIONE FW.....	26
FIGURA 10: CATENA DI ASSEMBLAGGIO LINEARE WW (WANG ET AL., 2009A) ...	29
FIGURA 11: CATENA DI ASSEMBLAGGIO U-SHAPED WW (WANG ET AL., 2009A)	30
FIGURA 12: PROCESSO DI APPRENDIMENTO (LIEVENS, 2009).....	36
FIGURA 13: CURVA DI APPRENDIMENTO DI WRIGHT	37
FIGURA 14: CAMPI DI APPLICAZIONE E RELATIVI TASSI DI APPRENDIMENTO	38
FIGURA 15: CURVA APPRENDIMENTO-DIMENTICANZA (M. Y. JABER & BONNEY, N.D.)	41
FIGURA 16: DIAGRAMMA DELLE PRECEDENZE DEL CASO PRATICO.....	48
FIGURA 17: ISTOGRAMMA DEI BILANCIAMENTI DI CIASCUN CASO.....	52
FIGURA 18: GRAFICO DI CONFRONTO CON PARAMETRO QTm_{max}	56
FIGURA 19: GRAFICO DI CONFRONTO CON PARAMETRO Tm, TOT	57

Indice delle tabelle

TABELLA 1: BILANCIAMENTO E TEMPI DI OZIO CON $PV\%=100\%$	48
TABELLA 2: DATI DEL PROBLEMA	49
TABELLA 3: BILANCIAMENTO DELLA LINEA CON $PV\%=100\%$	50
TABELLA 4: BILANCIAMENTO DELLA LINEA CON $PV\%=80\%$	50
TABELLA 5: BILANCIAMENTO DELLA LINEA CON $PV\%=60\%$	50
TABELLA 6: BILANCIAMENTO DELLA LINEA CON $PV\%=40\%$	50
TABELLA 7: BILANCIAMENTO DELLA LINEA CON $PV\%=20\%$	50
TABELLA 8: CONFRONTO DELLE CONFIGURAZIONI FW E WW VARIANDO $PV\%$..	58

INTRODUZIONE

Nel settore industriale la reattività alla risposta alla domanda di mercato e l'aumento della personalizzazione dei prodotti giocano un ruolo sempre più importante. Sebbene la tendenza delle aziende sia quella di aumentare il livello di automazione, nei sistemi di assemblaggio la presenza delle risorse umane è imprescindibile. Tutto ciò accade perché molte operazioni di montaggio risultano essere particolarmente complesse e l'implementazione di robot richiederebbe costi di investimento troppo alti e non giustificabili. Quando si parla di operatori umani, è facile intuire i numerosi vantaggi che questa soluzione può giovare come ad esempio una maggiore flessibilità rispetto ai volumi di produzione e la capacità di imparare nuove mansioni. In particolare, nelle linee di assemblaggio esistono due principali configurazioni: quelle a "operatori fissi" (Fixed Worker, FW) e a "operatori mobili" (Walking Worker, WW). La soluzione FW prevede che in ogni stazione sia presente un operatore il quale, dopo aver eseguito le proprie attività sul pezzo, consegna il sub-assemblato alla stazione successiva per la lavorazione seguente. Un grande vantaggio di questa configurazione è sicuramente legato al fatto che il coefficiente di utilizzo degli operatori è tanto maggiore tanto più i volumi di produzione si avvicinano ai volumi target e tanto più le stazioni sono bilanciate tra loro. In aggiunta è garantita anche una buona flessibilità del mix produttivo sebbene le competenze richieste all'operatore siano relativamente basse. In contrasto, però, la flessibilità dei volumi è ridotta: qualora la velocità di produzione dovesse cambiare rispetto alla condizione standard, è necessario il ribilanciamento e quindi è necessaria non solo una modifica del numero delle stazioni e riassegnazione dei task, ma anche del numero degli operatori da inserire nella linea.

Al contrario nella configurazione WW, l'operatore segue il prodotto lungo tutta la linea di produzione incrementando, stazione dopo stazione, la lavorazione del semilavorato. Ad assemblaggio completato, il lavoratore tornerà al punto di partenza per ricominciare il ciclo di produzione di un altro prodotto. Il principale vantaggio di questa soluzione è che consente una maggiore flessibilità rispetto alla variazione dei volumi di produzione non dovendo quindi ribilanciare l'intera linea

come accade nella FW. Infatti, il numero di stazioni rimane invariato, mentre il numero di operatori può variare in base alla produttività richiesta. Tuttavia, dovendo gli operatori imparare grandi quantità di mansioni, il tempo necessario all'apprendimento è proporzionale alla complessità delle attività. Risulta necessaria l'esperienza e le competenze iniziali che ogni dipendente deve possedere. Da ciò ne consegue che i costi iniziali sono maggiori rispetto alla soluzione complementare.

È intuibile come nelle linee di assemblaggio con operatori fissi, nasca la necessità di avere il numero di operatori uguale al numero delle stazioni di assemblaggio, cosa che invece non è strettamente richiesta nella soluzione con gli operatori mobili.

Indipendentemente dalla configurazione utilizzata, ad ogni lavoratore, infatti, è associata una curva di apprendimento, la quale mette in relazione la capacità che quest'ultimo ha di imparare nuovi task. Infatti, secondo il modello di Wright, tanto più un operatore ripete una stessa mansione, tanto minore è il tempo che impiega a svolgere il proprio incarico. Lo studio delle Learning Curve è necessario all'azienda poiché oltre a stimare la performance del lavoratore, consente di attribuire a ciascun operatore una mansione di difficoltà proporzionale alle sue capacità di apprendimento. In questo elaborato, si pone l'attenzione sull'effetto dell'apprendimento nelle due strategie sopra descritte andandole a comparare attraverso un caso pratico: facendo variare il rapporto dei volumi di produzione effettivi rispetto a quelli in condizioni standard e il parametro di confronto, viene dimostrato come la convenienza della scelta della configurazione possa cambiare

1 LINEE DI ASSEMBLAGGIO

1.1 Evoluzione delle linee di assemblaggio e della domanda di mercato

Il sistema di assemblaggio è stato introdotto agli inizi del 900' da Henry Ford con lo scopo di ottimizzare la produzione (e di conseguenza l'efficienza aziendale) riducendo i relativi costi e tempi necessari per la costruzione delle macchine.

Così nasce il sistema *Mass Production* teorizzato nello stabilimento produttivo della "Ford T" all'inizio dello sviluppo del mercato dell'automotive. Tutto ciò ha dato a Ford la possibilità di generare numerose scorte a magazzino con la consapevolezza che poi sarebbero state vendute. Il grado di personalizzazione del prodotto era nullo e non esistevano varianti della macchina ma solo un unico modello da cui deriva una famosissima citazione dell'imprenditore americano: "Ogni cliente può ottenere una Ford T colorata di qualunque colore desideri, purché sia nero". Per realizzare queste automobili, il sistema produttivo era ad integrazione verticale totale, in quanto ogni stabilimento o struttura che forniva benefici all'azienda era di proprietà Ford. Ovviamente questo sistema di produzione risultava molto limitato proprio per il fatto che non prevedeva alcuna possibilità di scelta da parte del cliente e nella linea di assemblaggio non era previsto alcun cambio di utensili.

Quando il mercato cominciò a richiedere una maggiore varietà, la Mass production entrò in crisi passando così ad un sistema *Batch and Queue*, cioè a "lotti e code". Tale sistema produceva grandi lotti di diversi prodotti con lo svantaggio di creare stock elevati senza alcuna certezza di vendita. Questo sistema produttivo, definito intermittente, venne adottato per rispondere ad un diverso contesto di mercato concernente varianti di automobili.

Taiichi Ohno, ingegnere giapponese, considerato il padre del sistema di produzione dell'azienda automobilistica Toyota, negli anni '30 diede vita ad una nuova filosofia di produzione, chiamata *Lean management* (ovvero produzione snella).

Secondo la sua visione, il modello *Batch and Queue* non era in grado di soddisfare rapidamente le richieste dei clienti. Il nuovo modello di linea di assemblaggio proponeva: l'utilizzo di macchinari con output minori ma che consentissero di essere maggiormente flessibili (possibilità di realizzare diverse varianti); di effettuare cambi veloci tra un lotto e un altro usando la tecnica chiamata SMED (Single Minute Exchange Die), di posizionare i macchinari nella sequenza richiesta dal processo e di avere una risposta più veloce alla domanda di mercato (JIT: Just In Time).

1.2 Classificazione delle linee di assemblaggio

Per linea di assemblaggio si intende la disposizione delle macchine, dei lavoratori e delle attrezzature atta a ottenere un flusso continuo di pezzi, consentendo il montaggio di un prodotto tramite una sequenza specifica di task, ovvero una porzione di lavoro totale necessaria ad eseguire l'assemblaggio completo e solitamente è un'attività non scomponibile in compiti più semplici. In ogni stazione, predisponendo dei materiali e strumenti necessari, vengono eseguite solo alcune delle operazioni specifiche richieste per l'assemblaggio completo del prodotto. Ogni operazione viene effettuata in successione e l'ordine viene stabilito dal diagramma delle precedenze (o grafo). I cerchi rappresentano i task, ovvero le attività che devono essere compiute per raggiungere il completamento del prodotto finito, mentre le frecce ne identificano le precedenze. La durata dell'attività viene stabilita dal numero predisposto al di fuori dei cerchi.

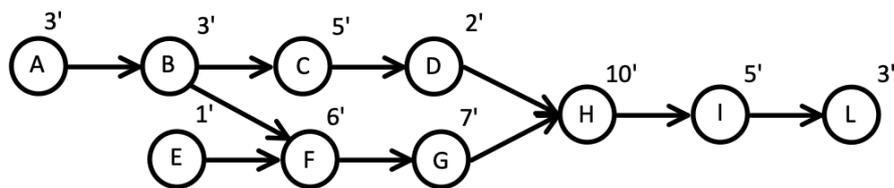


Figura 1: esempio di diagramma delle precedenze

A causa del fatto che ogni attività ha tempi di svolgimento differenti, è necessario effettuare il bilanciamento completo della linea. Con bilanciamento, viene inteso un processo di riorganizzazione del lavoro che viene effettuato in ogni stazione con l'obiettivo principale di omogeneizzare il carico lavorativo. Ciò consente una riduzione del tempo di ciclo (intervallo di tempo massimo consentito

a ciascuna stazione per completare le proprie mansioni senza causare un ritardo di produzione): se a tutte le postazioni di assemblaggio vengono assegnate attività che possiedono un tempo complessivo di lavorazione uguale, allora nessuna stazione ozierà.

Le linee di assemblaggio possono essere classificate in base:

- al layout;
- alla varietà dei prodotti;
- al ritmo di produzione.

1.2.1 Layout

Una prima classificazione delle linee di assemblaggio può essere fatta sulla base del layout, ovvero sul posizionamento spaziale delle stazioni di lavoro.

La soluzione più semplice è quella a layout *rettilineo* (figura 2). Tutte le stazioni sono posizionate in serie, in modo tale da garantire un flusso lineare del prodotto. La movimentazione che viene usata consiste in un sistema di trasporto unidirezionale e automatizzato. Questo perché il layout è trasparente, ovvero quando un prodotto è stato processato da una stazione produttiva, è possibile individuare il macchinario successivo che dovrà effettuare la lavorazione seguente.

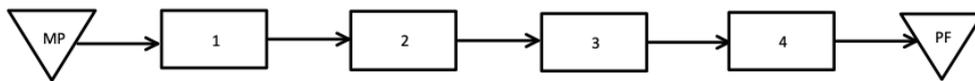


Figura 2: layout rettilineo

Dove sono presenti colli di bottiglia, è possibile raddoppiare o più in generale aumentare il numero di macchinari (figura 3), posizionandoli in parallelo anziché in parallelo frazionato (soluzione che consente di aumentare la disponibilità e quindi anche dell'efficienza dell'impianto, riducendo la potenzialità richiesta al singolo macchinario e quindi anche i costi di investimento).

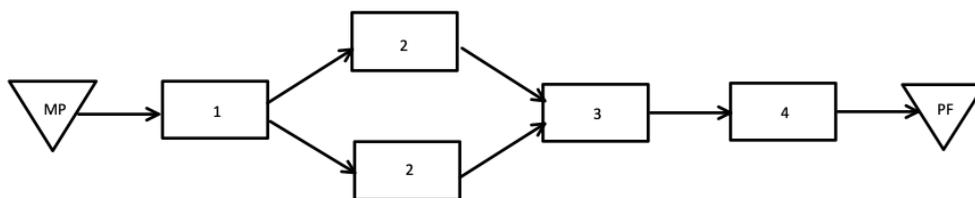


Figura 3: layout rettilineo con parallelo semplice

Per riuscire ad ottimizzare gli spazi e migliorare la comunicazione degli operai, è possibile usare un *layout a "forma di U"*. Questa soluzione consente di mantenere disaccoppiate gli ingressi MP e le uscite dei PF e ridurre il numero di operatori necessari poiché questi ultimi possono svolgere attività sia in un ramo della linea sia nell'altro (elevato numero di combinazioni di tasks da associare a ciascun lavoratore).

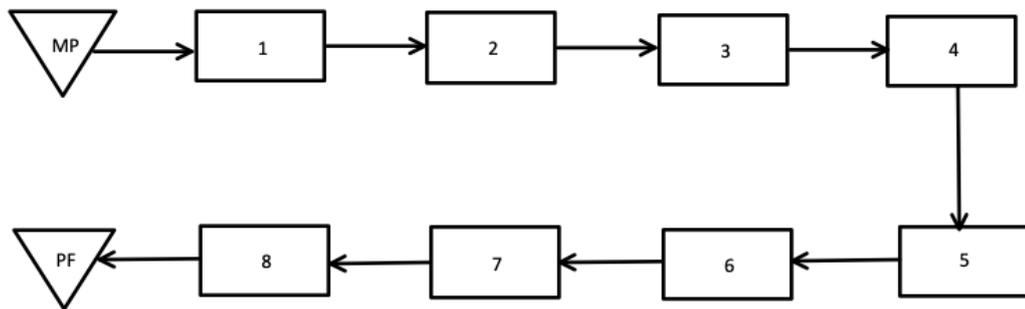


Figura 4: layout a forma di U

Un'altra soluzione consiste nell'utilizzo di linee produttive *convergenti*: vengono effettuate più lavorazioni in parallelo, le quali convergono verso un'unica stazione per essere processate contemporaneamente. Questa soluzione viene tipicamente utilizzata nell'industria manifatturiera per la produzione di beni strumentali.

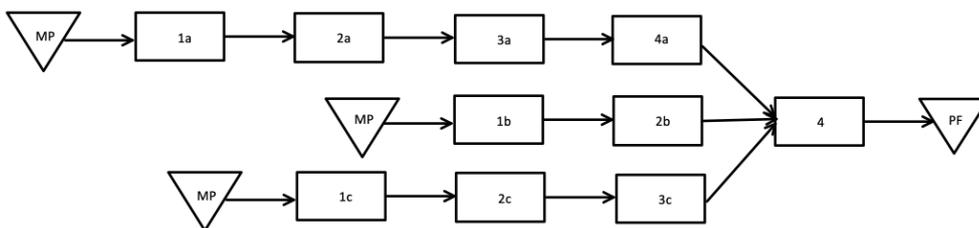


Figura 5: layout convergente

1.2.2 Varietà prodotti

Le linee di assemblaggio vengono classificate anche in base alla varietà di prodotto in:

- single-model;
- multi-model;
- mixed-model.

Una *linea single model* è caratterizzata in generale dalla produzione di un unico output. Una particolare sottocategoria della single model potrebbe essere un'azienda la quale produce una varietà di prodotti, che non necessitano di particolari riattrezzaggi dei macchinari come potrebbe accadere per una azienda di bottiglie.



Figura 6: linea single-model

Quando il mix produttivo comincia ad essere particolarmente elevato, si fa riferimento a due tipologie differenti di linee di assemblaggio: le multi-model quando vengono realizzati lotti di prodotti diversi e le mixed-model quando invece vengono realizzati lotti di prodotti differenti caratterizzati da un volume pressoché unitario.

Nel caso delle linee *multi-model*, per la produzione dei diversi lotti, sono previsti tempi di set-up dei macchinari. Esse richiedono tecniche come lo SMED per la riduzione dei tempi di set-up e i bilanciamenti della linea si diversificano al variare di ciascun prodotto. Il cambio del lotto di produzione avviene solo dopo che è stata definita la grandezza del lotto economico (ovvero quel volume di prodotto che consente di minimizzare i costi e massimizzare i profitti).



Figura 7: linea multi-model

Nelle linee *mixed-model*, non si avverte la necessità di fare uno studio sull'EOQ (lotto economico), dal momento in cui, l'impresa non andrà a produrre a lotti ma esclusivamente quanto richiesto dal mercato. Per riuscire a raggiungere questo grado di flessibilità di volumi di produzione (o comunque riuscire a rispondere alla richiesta del cliente), è importante che i prodotti processati in questa linea appartengano alla stessa famiglia in modo tale da rendere trascurabili i tempi di riattrezzaggio evitando così un enorme calo di efficienza. Queste linee, in particolare, vengono implementate per l'assemblaggio di prodotti modulari e la linea produttiva solitamente utilizzata è quella asincrona poiché consente il disaccoppiamento tra le diverse stazioni.



Figura 8: linea mixed-model

L'uso di una soluzione mixed-model, secondo (Rekiek, 2006), è consigliabile quando:

- la varietà degli articoli della linea deve appartenere alla stessa famiglia di prodotti;
- ogni modello richiede lo stesso ciclo di produzione;
- il tempo di recapito del prodotto non deve essere rapido;
- i tempi riattrezzaggio macchina sono di breve durata o ininfluenti nel passaggio da un prodotto finito ad un altro;
- i tempi di produzione dell'insieme dei prodotti deve essere superiore al minuto.

1.2.3 Ritmo di produzione

Un'altra importante classificazione delle linee di assemblaggio può essere effettuata anche sulla base del ritmo di produzione. Le linee a *ritmo costante* (o paced assembly line) solitamente utilizzano un sistema di movimentazione automatico: ogni stazione è vincolata dal tempo di ciclo T_c (intervallo di tempo che ciascuna postazione di assemblaggio possiede per completare le proprie attività

senza causare ritardi di produzione) e, ogni qual volta venga raggiunto questo valore, il sub-assemblato viene trasportato alla stazione lavorativa successiva. Queste linee sono caratterizzate da un ritmo di produzione costante e cadenzato dal T_c . Qualora l'operatore non riesca a completare il semilavorato in tempo, quando viene trasferito alla stazione successiva, sarà il lavoratore seguente a doversi preoccupare anche delle lavorazioni mancanti.

Se ogni stazione lavora a velocità di produzione differente, la linea di assemblaggio viene definita a *ritmo variabile* (o unpaced assembly line). Per riuscire a contrastare questo ostacolo, nella linea di assemblaggio viene ricavato dello spazio per inserire dei buffer inter-operazionali. Infatti, a causa della differenza delle produttività tra le stazioni, si potrebbero generare due situazioni opposte:

- quando la stazione successiva è più lenta rispetto a quella precedente, il semilavorato non può essere processato perché la postazione a valle deve ancora finire di completare la lavorazione sul pezzo;
- quando la stazione successiva è più veloce rispetto a quella precedente, la stazione a valle non lavora perché il semilavorato è ancora in fase di processazione nella postazione a monte.

La produttività di queste linee non è costante proprio per i motivi sopra descritti.

1.3 Flessibilità

La flessibilità è un concetto largamente discusso in letteratura. Vedremo infatti che potranno essere distinte diverse sfumature di questo termine, ognuna delle quali è legata all'altra.

Secondo (Sethi, 1990) esistono 11 sfaccettature che caratterizzano il significato di flessibilità. Esse sono:

- la "flessibilità di una macchina" corrispondente alla capacità che un robot di assemblaggio possiede per passare facilmente da un'operazione ad un'altra. È importante evidenziare che la macchina deve sfruttare software "semplici" in modo tale che, nel caso in cui risulti

necessario apportare delle modifiche di produzione, queste non vadano a richiedere elevati costi o tempi per la riprogrammazione;

- la “flessibilità di un sistema di movimentazione dei materiali” si identifica nella capacità di spostare efficientemente i prodotti in una corretta posizione. Avere un sistema di movimentazione flessibile, consente di avere una maggiore disponibilità dei macchinari e, di conseguenza, una riduzione dei tempi di produzione. Questa condizione può essere raggiunta quando vengono implementati dispositivi di trasporto come carrelli elevatori transpallet...;
- la “flessibilità operativa” è la capacità che un impianto possiede nel poter realizzare un prodotto con un piano di prodotto alternativo (termine con il quale si identifica la sequenza di operazioni dirette a produrre un componente o un oggetto). Questo è possibile solo se è lo stesso apparato di movimentazione della linea a consentirlo;
- la “flessibilità di processo” è la capacità che un processo possiede nel passare dalla produzione di un prodotto ad un altro senza importanti configurazioni. Lo scopo di questa flessibilità è quella di poter produrre lotti di minori dimensioni e quindi esaudire la domanda di mercato;
- la “flessibilità di prodotto” è la capacità di poter sostituire un componente con uno di nuova concezione in modo economico e rapido. Questa caratteristica, quindi, è essenziale perché consente all’impresa di essere più reattiva alle nuove richieste del mercato;
- la “flessibilità di instradamento” è la capacità di un sistema di produzione di produrre un utile, attraverso percorsi alternativi, disponendo di macchinari multiuso e generici. Ciò implica che il prodotto non deve essere necessariamente lavorato dalle stesse macchine o da uguali operazioni, ma può essere ottenuto anche attraverso sequenze di operazioni differenti;
- la “flessibilità del volume” è la capacità di un sistema di riuscire a operare in maniera redditizia anche a livelli di produzione differenti. Questa caratteristica è molto richiesta soprattutto per quelle aziende

- che operano su un mercato con domanda molto instabile. È importante rilevare che, se un'impresa riduce i costi variabili, essa per definizione sarà meno flessibile di una che invece cercherà di ridurre i costi fissi;
- la “flessibilità di espansione” è l’abilità che un sistema possiede in relazione all’aumento della capacità produttiva al bisogno. Questa caratteristica è importante per le imprese in crescita;
 - la “flessibilità di programma” può essere intesa come l’affidabilità di un impianto, ovvero la capacità di una linea di funzionare senza necessità di manutenzione per un periodo sufficientemente lungo. Ciò consente di avere meno interruzioni, programmate e no, e quindi di diminuire il tempo di produzione;
 - la “flessibilità produttiva” è la capacità che il sistema di produzione possiede al fine di riuscire a produrre prodotti differenti rispetto alla gamma prevista, senza aggiungere altri strumenti (es. macchinari). Questa caratteristica facilita tutte quelle aziende che vogliono competere in un mercato che richiede frequentemente prodotti nuovi;
 - la “flessibilità di mercato” è la capacità di un sistema produttivo di riuscire a adeguarsi a un mercato in evoluzione. Questa è una caratteristica che viene ricercata da tutte quelle imprese che operano in un ambiente in costante mutamento.

1.4 SMED (Single Minute Exchange Die)

Lo SMED venne introdotto per la prima volta dal giapponese Shigeo Shingo nel 1950 nel periodo in cui lavora in Toyo Kogyo (Mazda). Egli sosteneva che, per incrementare la produzione, non fosse strettamente necessario l’acquisto di nuovi macchinari, ma, al contrario, bisognasse sfruttare meglio le risorse già in possesso dell’azienda. Al fine di ridurre i tempi di produzione, risulta quindi inevitabile eliminare tutti quei componenti che non danno valore aggiunto al prodotto finito, proprio come i tempi morti dovuti all’attrezzaggio macchina. L’obiettivo cardine è quello di riuscire a passare dalla produzione di un prodotto ad un altro più velocemente possibile, garantendo una maggiore flessibilità di miscelazione.

Ponendoci ora nell'ottica di un operatore la cui mansione lavorativa consiste nel riattrezzare la macchina ogni qualvolta si verifichi una variazione del lotto di produzione, andiamo ad analizzare i tempi di set-up (tempo che intercorre dalla produzione dell'ultimo pezzo buono del lotto precedente, alla produzione del primo pezzo buono del lotto successivo) i quali si differenziano in:

- tempi di set-up esterni (OED): attività che possono essere effettuate anche quando il macchinario o la linea sta lavorando;
- tempi di set up interni (IED): attività che possono essere effettuate solo quando il macchinario o la linea è ferma (es. lubrificazione degli ingranaggi).

Si può facilmente intuire che, il tempo che non dà valore aggiunto, è proprio quello dello IED. Gli obiettivi di questa tecnica sono i seguenti:

- ridurre i set-up interni;
- aumentare la produzione e quindi il coefficiente di utilizzo dei macchinari;
- ridurre i lotti di produzione e le scorte di prodotti finiti;
- ridurre i lead time di produzione e di conseguenza i tempi di risposta alla domanda del mercato.

Prima di applicare questa tecnica è necessario analizzare la situazione attuale cercando di rilevare tutti i tasks svolti dai dipendenti in una stazione di lavoro.

Dopo aver distinto le attività interne da quelle esterne, bisogna agire sugli IED convertendoli in attività da svolgere a macchina spenta. Così facendo, la produttività del reparto, o più in generale della linea, aumenta.

1.5 Modularità

La modularità è una tecnica molto utilizzata per aumentare la varietà di produzione e si basa sulla standardizzazione dei componenti dei diversi modelli dei PF. Così facendo vengono ridotte le attività che possono essere effettuate su previsione.

Ciò consente di diminuire i tasks da svolgere su commessa nel momento in cui arriva l'ordine.

I vantaggi della modularità (articolo Engele Elisabeth et al., 2013) consentono:

- di ottenere un'ampia varietà di prodotti, modificando solo l'accoppiamento dei moduli, senza dover produrre componenti diversi per prodotti finiti diversi;
- la possibilità di utilizzare componenti comuni al fine di aumentare la produttività riducendone i costi complessivi;
- di perfezionare tutti i prodotti costituiti dagli stessi elementi, andando a potenziare solo il singolo componente.

2 LINEE DI ASSEMBLAGGIO CON OPERATORI FISSI (FW) E MOBILI (WW)

2.1 Fixed Worker (FW)

La soluzione “a operatori fissi” viene diffusamente utilizzata nelle linee di assemblaggio. In ogni stazione, è presente un operatore il quale, dopo aver eseguito le proprie attività sul pezzo, consegna il sub-assemblato alla stazione successiva per la lavorazione seguente.

Se le FW, da una parte, sono caratterizzate da un alto mix di flessibilità, dato che costituisce una soluzione ampiamente utilizzata nelle mixed-model, dall'altra, la flessibilità di volume ne risente in maggior misura. Ciò è dovuto alle problematiche di ribilanciamento che si verrebbero a verificare qualora ci fossero delle variazioni dei volumi di produzione dovuti ad un cambiamento della domanda. Una Fixed Worker necessita infatti di un numero di stazioni lavorative pari al numero di lavoratori, garantendo così anche una buona efficienza ma generando dispendio quando il volume di produzione risulta relativamente basso rispetto a quello utilizzato per il bilanciamento. In particolare, non è possibile cambiare la disposizione delle stazioni né tantomeno il loro numero e l'assegnazione dei task.

Un aspetto sicuramente vantaggioso di questa soluzione è che, se la linea è correttamente bilanciata, possiede un tempo di ciclo molto ridotto, sebbene le competenze lavorative trasversali richieste all'operatore, siano basse. La velocità di produzione che si ottiene è legata all'operatore più lento nello svolgimento della propria mansione. Infatti, esso rappresenterà il collo di bottiglia: l'operatore successivo non potrà eseguire la propria lavorazione poiché il sub-assemblato è ancora in fase di montaggio nella stazione precedente.

In aggiunta, la risorsa umana, in opposizione con il caso ideale, necessita di momenti di pausa nello svolgimento del proprio turno lavorativo, andando così ad inficiare su quello che idealmente sarebbe il desiderio dell'impresa, ossia la produzione ininterrotta. È evidente come qualsiasi variazione di tempo in un

qualunque punto della catena, rispetto a quello definito dal bilanciamento, può provocare grandi scompensi nella linea e ritardi rispetto al programma di produzione.

Il bilanciamento risulta essere di fondamentale importanza nella soluzione a operatori fissi, perché:

- se gli operatori di una stessa linea svolgono tutti i propri tasks nel medesimo tempo, non ci saranno tempi di attesa tra le diverse stazioni e quindi si verificherà un maggiore utilizzo della linea di assemblaggio.
- se i volumi di produzione si avvicinano alla massima capacità della linea, maggiore sarà il coefficiente di utilizzo della manodopera.

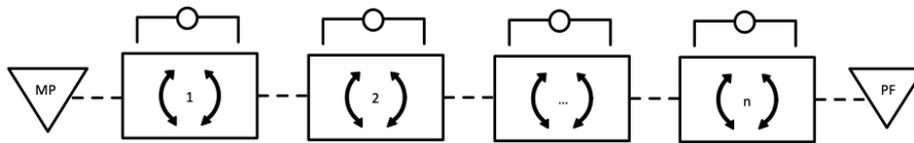


Figura 9: Linea di assemblaggio con configurazione FW

2.1.1 Vantaggi e svantaggi del sistema Fixed Worker

Dopo aver elencato le principali caratteristiche della configurazione a operatori fissi, è possibile sintetizzare i vantaggi che ne derivano. La soluzione viene principalmente utilizzata da tutte quelle attività commerciali che operano in un mercato in cui la domanda è molto stabile. Infatti, tanto più i volumi di produzione sono simili a quelli del bilanciamento, tanto più il coefficiente di utilizzo della manodopera si avvicina al 100% con conseguente diminuzione del tempo di ciclo. In aggiunta le competenze trasversali che vengono richieste agli operatori sono ridotte, perché solitamente, il numero di task, che vengono assegnate a ciascun dipendente, è ristretto. Anche la varietà del mix produttivo ne risente positivamente: infatti gli operatori riescono a cambiare e svolgere efficacemente tutte quelle nuove attività dovute ad un possibile cambio di produzione. Tutto ciò concorre al raggiungimento dell'obiettivo principale di questa configurazione: ridurre il tempo necessario per lo svolgimento delle attività in ciascuna stazione (da ciò

ne deriva il fatto che la velocità di produzione è dettata dal collo di bottiglia, ovvero dalla stazione più lenta).

Il rovescio della medaglia di questa soluzione è determinato dalla flessibilità di volume molto ridotta. Qualora dovesse avvenire una diminuzione o aumento della richiesta da parte dei clienti, per modificare il quantitativo di volumi di produzione, è necessario il ribilanciamento dell'intera linea di assemblaggio. Questo comporterà non solo una variazione del numero degli operatori e delle stazioni, ma anche una conseguente redistribuzione delle postazioni di lavoro. Questo ovviamente richiede un elevato quantitativo di tempo e denaro andando quindi ad influire negativamente sull'indice di efficienza globale della linea, sottolineando ancora una volta, l'importanza di non applicare questa configurazione in condizione di mercato instabile.

2.2 Walking Worker (WW)

Come analizzato nel capitolo 1, le richieste dell'acquirente sono sempre più difficili da soddisfare: infatti, l'azienda non deve essere solo in grado di consentire al cliente la possibilità di personalizzare il proprio prodotto, ma anche di consegnare il bene in un tempo più breve possibile. Questi obiettivi possono essere raggiunti più facilmente con un nuovo approccio dell'organizzazione degli operatori nelle linee di assemblaggio: i Walking Worker. Come viene riportato in (Al-Zuheri et al., 2016) l'utilizzo di modelli matematici esatti, per risolvere il problema di progettazione di tale sistema, risulta essere complesso. Questo perché non solo vengono considerate le capacità del lavoratore, ma anche le loro competenze nello svolgimento di queste mansioni. Tutto ciò consente di utilizzare modelli stocastici piuttosto che deterministici.

Con questa soluzione, l'operatore segue il prodotto lungo tutta la linea di produzione incrementando, stazione dopo stazione, la lavorazione del semilavorato. Ad assemblaggio completato, il lavoratore tornerà al punto di partenza per ricominciare il ciclo di produzione.

Oltre a garantire un'elevata flessibilità e una più semplice gestione della personalizzazione del prodotto, il numero di operatori potrebbe essere minore o uguale rispetto al numero delle stazioni. Normalmente il coefficiente di utilizzo

della manodopera è alto. Questo accade solo quando il numero di lavoratori attuali nella linea di produzione è ottimizzato rispetto al volume di produzione target.

Un altro aspetto sicuramente positivo è che questa tipologia di linea di assemblaggio è robusta rispetto al volume di produzione entro certi limiti. Se aumenta la domanda, con gli stessi operatori e gli stessi macchinari riesco ad aumentare la produzione. Nel caso opposto, posso continuare a produrre senza dover incorrere in costi aggiuntivi eccessivi. Non vado a ribilanciare la linea fino a quando la condizione attuale non risulta essere economicamente sconveniente

Le conoscenze, che vengono richieste all'operatore sul ciclo di produzione, sono maggiori. A differenza dei FW, i lavoratori, dovendo svolgere più operazioni lungo la linea di assemblaggio, devono possedere più competenze. È l'azienda che si occupa della formazione dell'operatore così da non vincolarlo a lavorare in una sola stazione, ma consentirgli di seguire il pezzo in più postazioni: tutto questo avviene attraverso un insegnamento incrociato così da consentire all'operatore di essere in grado di assemblare e completare il prodotto dall'inizio alla fine.

2.2.1 Tipologie di linee Walking Worker

Le linee WW possono avere design differenti:

- *Catena di assemblaggio lineare* (figura 10): questa configurazione prevede l'implementazione di una tecnica denominata a "bucket brigades" in cui l'operatore esegue le lavorazioni su un pezzo nella propria stazione di assemblaggio, e una volta completate, dopo aver consegnato il sub-assemblato all'operatore successivo, torna all'inizio della propria stazione per ricevere l'ordine dal collega precedente e ripetere le operazioni. Questo metodo non necessita di buffer inter-operazionali di dimensioni considerevoli (il loro dimensionamento è basato sulla variazione dei tempi di lavorazione di ciascuna stazione di lavoro). Ciò consente di ridurre notevolmente i WIP. In aggiunta il bilanciamento della linea di produzione e l'assegnazione delle risorse umane è più semplice.

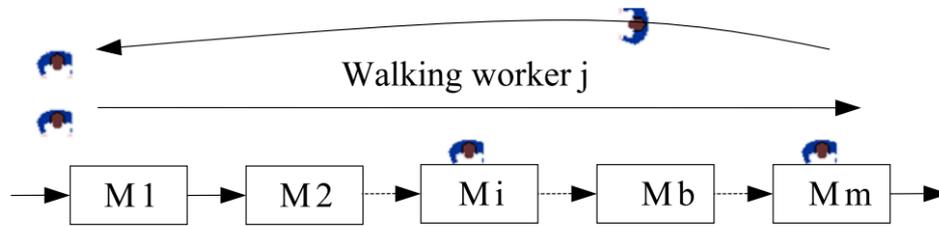


Figura 10: catena di assemblaggio lineare WW (Wang et al., 2009a)

- *Catena di assemblaggio a U* (figura 11): in questo caso i lavoratori vengono posizionati all'interno della linea e possono operare su più stazioni di lavoro. Ciò è dovuto dal fatto che con questo tipo di layout, c'è una maggiore compattazione degli spazi della linea e quindi al lavoratore può risultare più facile seguire l'intero processo del sub-assemblato. Poiché i tempi di lavorazione sono differenti da task a task, è necessario comunque fare un corretto bilanciamento così da non creare dei tempi morti tra un'operazione e l'altra. Ricordando la definizione di takt-time, agli operatori di una linea potrebbero non essere assegnate attività consecutive; quindi, la riduzione delle distanze percorse da ciascun'operazione gioca un ruolo fondamentale. Ciò consente una maggiore efficienza della produttività dei lavoratori e una conseguente maggiore flessibilità. Ovviamente, nell'ottica di operare nel mercato come un'azienda JIT, i vari parametri precedentemente enunciati possono essere migliorati attraverso l'implementazione di strategie aziendali come kanban, modularità, logica di pull... con lo scopo di ridurre ad esempio i WIP, tempi di lavorazione. Con questa soluzione, affiancando i macchinari tra loro, si riusciranno a contrarre, oltre che i tempi di lavorazione, anche il numero di operatori necessari alla linea. La conseguenza diretta di ciò è che il numero di lavoratori è molto inferiore rispetto al numero di stazioni di lavoro e l'utilizzo dei macchinari non risulta elevato rispetto alla loro massima potenzialità produttiva. In aggiunta, il bilanciamento della linea risulta essere più complesso da trattare, poiché è necessario considerare anche la possibilità che gli operatori hanno di incrociarsi.

Nella u-shaped possono essere implementate due tecniche:

- a. Rabbit Chase: tecnica in cui l'operatore assembla indipendentemente il prodotto muovendosi lungo la linea con il suo sub-assemblato. Una volta giunta a termine l'operazione, questo prende un nuovo pezzo e ricomincia il ciclo di lavorazione. Ciò consente agli operatori più rapidi di poter superare quelli più lenti senza rallentare la produzione.
- b. Baton Touch: è invece molto simile alla bucket brigade, ma ogni lavoratore ha una porzione definita di compiti da svolgere. Come in una staffetta in cui ogni corridore deve coprire una distanza fissa, ogni operatore deve gestire un numero fisso di processi. Questo metodo può migliorare l'efficienza e la specializzazione, riducendo il tempo necessario per completare i singoli tasks.

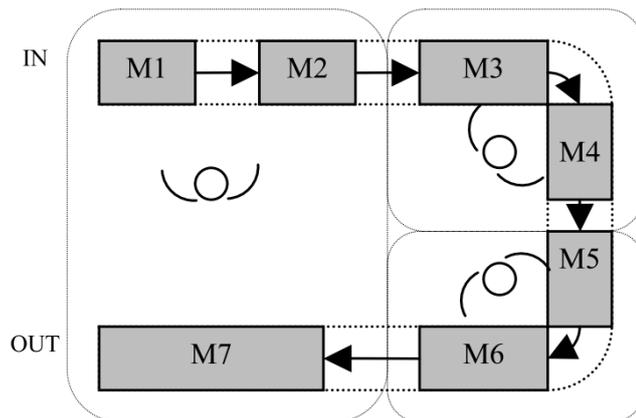


Figura 11: catena di assemblaggio U-Shaped WW (Wang et al., 2009a)

È possibile evincere alcune caratteristiche della soluzione u-shaped:

- 1) essendo una linea WW, dal momento in cui i lavoratori hanno effettuato un periodo di apprendimento della mansione, se la domanda del mercato varia, risulta possibile riconfigurare facilmente la linea;
- 2) la predisposizione di questa soluzione consente di ridurre le distanze tra i diversi macchinari. Ciò sicuramente ha un risvolto positivo nella riduzione dei “waste time” e in particolare nei “travel time”;
- 3) questa soluzione stimola la collaborazione e comunicazione degli operai;

- 4) grazie alla compattazione della linea, lo spazio percorso dagli operatori è molto più ridotto.

L'aspetto peculiare delle linee di assemblaggio WW, è che gli operatori devono essere formati sull'intero ciclo produzione. Per questo motivo il tempo necessario all'apprendimento è direttamente proporzionale alla complessità delle mansioni richieste per l'assemblaggio del prodotto intero. Da ciò è possibile evincere quanto sia effettivamente più complicata l'organizzazione del lavoro, la scelta del numero di lavoratori richiesti nella linea e anche la loro formazione. Tutto questo si traduce in costi iniziali più elevati e tempi più lunghi per il raggiungimento delle condizioni target.

2.2.2 Vantaggi e svantaggi del sistema Walking Worker

Una volta comprese le principali caratteristiche della linea di assemblaggio WW, risulta importante analizzare i vantaggi che la soluzione con i lavoratori mobili offre.

Grazie alla capacità che il sistema a lavoratori ambulanti ha di adattarsi alle variazioni del mix produttivo (aumento del grado di personalizzazione dei prodotti) e del volume di produzione (dimensionare i lotti in base alle richieste del mercato proprio come nelle aziende Make to Order), è possibile ricavare una maggiore flessibilità globale.

Un ulteriore vantaggio, invece, è legato alla possibilità di ridurre il numero di buffer inter-operazionali e quindi anche i costi. Poiché un singolo operatore, in queste linee di assemblaggio svolge più operazioni di montaggio sullo stesso prodotto, la necessità di punti di disaccoppiamento tra le diverse stazioni sarà minore. Una conseguenza di questo fenomeno è anche la riduzione sia dei semilavorati (WIP) sia dello spazio occupato dalla linea di assemblaggio.

Dal momento in cui le conoscenze richieste all'operatore sul ciclo di produzione sono maggiori, la qualità del prodotto ne risentirà positivamente. In aggiunta, per l'operatore, risulta più semplice riuscire a monitorare la qualità del prodotto dato che esso dovrà svolgere tutte le attività, se lavoratore multi-specializzato, sul sub assemblato. La tecnica dell'FW, si focalizza invece sulla riduzione del tempo di svolgimento della singola attività e non sulla riduzione dei tempi di

esecuzione della linea nel suo complesso, elementi che comportano un grosso svantaggio.

2.3 Confronto tra FW e WW

Indicatori	Operatori fissi	Operatori mobili
Confronto fra il numero di operatori e il numero di stazioni	Il numero di operatori corrisponde al numero di stazioni.	Il numero di operatori può essere inferiore o al più uguale al numero di stazioni.
Mix flessibilità	Alto mix-flessibilità, infatti, viene usato nelle linee di assemblaggio mixed-model.	Alto mix-flessibilità, infatti, viene usato nelle linee di assemblaggio mixed-model.
Flessibilità di volume	Bassa. Infatti, se avviene una variazione di volume, si verificherebbero delle problematiche legate al ribilanciamento della linea.	Alta. Questa soluzione non risente della variazione dei volumi (entro certi limiti), infatti non risulta necessario alcun tipo di ribilanciamento.
Utilizzo della manodopera	Dipende dai volumi di produzione: tanto più questi si avvicinano alla massima capacità della linea, tanto maggiore risulterà essere l'utilizzo della manodopera.	Risulta essere tanto più elevato, se il numero di lavoratori è ottimizzato in conseguenza del volume di produzione target.
Capacità lavorative richieste	Basse competenze richieste.	I lavoratori vengono addestrati in modo incrociato (metodo di insegnamento che consente di formare un dipendente a tutte quelle mansioni lavorative per cui inizialmente non era qualificato) al fine di svolgere più attività rispetto ai FW.
Efficienza	Elevata poiché il numero di stazioni corrisponde al numero dei lavoratori (ogni volta che avviene una variazione di volume, avviene il ribilanciamento).	Se il numero di lavoratori è ottimizzato rispetto al volume di produzione, allora l'indice di efficienza è alto.

Flessibilità layout	Bassa. Non c'è possibilità di cambiare la disposizione delle stazioni, il loro numero e l'assegnazione dei task, a meno che non avvenga il ribilanciamento.	Alta. Entro certi limiti, qualora cambiasse il volume di produzione, è possibile cambiare la disposizione delle stazioni, il loro numero e l'assegnazione dei task.
Forma del layout	Solitamente vengono utilizzate in un layout in linea.	Solitamente vengono utilizzate in un layout a U.

3 CURVA DI APPRENDIMENTO

L'apprendimento è un fenomeno attraverso il quale vengono acquisite non solo informazioni e conoscenze, ma anche abilità. Uno dei primi studi sull'apprendimento fu condotto dallo psicologo tedesco Hermann Ebbinghaus nel 1885. Egli si concentrò sia sulla fase di apprendimento, sia sulla fase di declino. Come strumento per la sua ricerca, Ebbinghaus, utilizzò un test di memorizzazione con sillabe senza senso, verificando come nei primi 20 minuti, molte sillabe venivano apprese e dimenticate. Dimostrò come, sessioni di apprendimento distanziate nel tempo, migliorano la memorizzazione rispetto a una singola seduta intensiva. Grazie ai suoi studi, il filosofo tedesco riuscì a delineare la curva del learning. Il processo dell'apprendimento, si distingue in: apprendimento autonomo e indotto.

Per *apprendimento autonomo (o di primo ordine)* si intende una fonte di natura più pratica, ovvero l'esperienza nasce da lunghi periodi di produzione che consentono l'acquisizione di automatismi migliorativi. Infatti, incrementando il numero di ripetizioni delle attività, l'operatore riesce ad acquisire maggiore dimestichezza nello svolgimento delle mansioni.

Al contrario, secondo (Levy, 1965), per *apprendimento indotto (o di secondo ordine)* si intende quella fase di acquisizione programmata di nuove competenze che avviene attraverso l'investimento di risorse innovative, non disponibili nella situazione attuale in cui versa l'azienda. Secondo (Adler, 1991), possono essere apportate delle modifiche nel processo di produzione attraverso delle azioni manageriali o ingegneristiche. Da ciò ne derivano due attività di apprendimento:

- modifica ingegneristica. Individuazione degli errori progettuali attraverso l'esperienza dei lavoratori per apportare migliorie che consentono oltre che la riduzione dei costi, anche la risoluzione di tutti i problemi di produzione;
- programmi di formazione. È necessario aumentare il fattore esperienza attraverso dei corsi di formazione per migliorare le competenze di ciascun lavoratore.

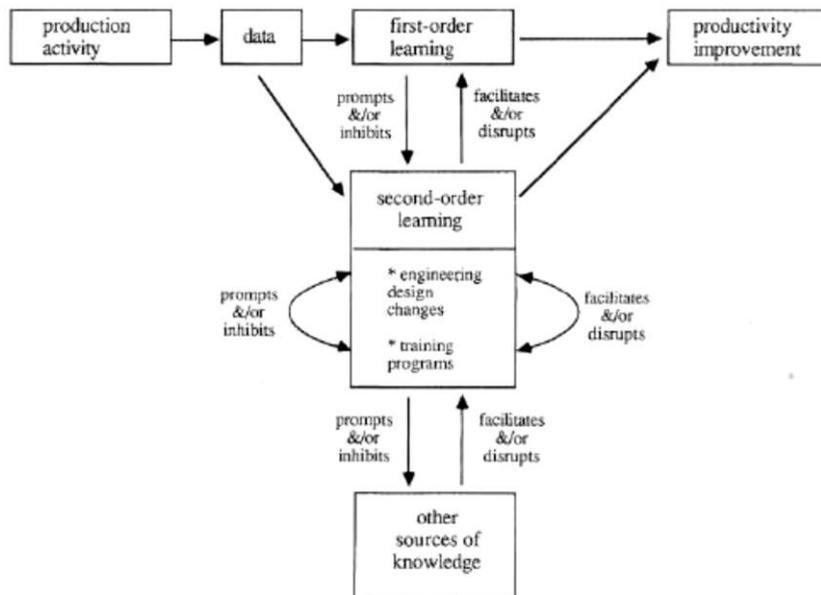


Figura 12: processo di apprendimento (Lievens, 2009)

In particolar modo, a seconda dei casi, l'apprendimento di primo ordine può facilitare o addirittura ostacolare l'apprendimento del secondo ordine e viceversa. Infatti, prima che i benefici del nuovo cambiamento vengano rilevati, è possibile che, attraverso una modifica di ingegneria possa avvenire una riduzione delle prestazioni dell'operatore a causa di distrazione, oppure potrebbe nascere la necessità di formazione dei dipendenti.

3.1 Curva di apprendimento: modello di Wright

Wright nel 1936, fu il primo ad aver ipotizzato una possibile applicazione delle Learning Curve (LC) nell'ambito industriale descrivendo come il costo del lavoro su un particolare modello di aereo, decrementi all'aumentare del periodo di apprendimento. Le LC mettono in relazione il costo sostenuto rispetto all'output generato in un determinato periodo di tempo. Infatti, è possibile in questo modo andare ad assegnare al dipendente un carico di lavoro proporzionale alle sue capacità, aumentare la produttività, ridurre i costi, piuttosto che diminuire i ritardi e aumentare la qualità del prodotto finale.

Il modello di Wright, viene definito uni-variante, poiché esso mette in relazione una variabile dipendente (tempo o costo di produzione) con una

indipendente (unità prodotte). Wright si accorse che, aumentando i volumi di produzione, i costi diretti calavano. Ciò è diretta conseguenza del fatto che l'operatore, con l'aumento della produttività, incrementa il numero di ripetizioni del medesimo task riducendone gli errori e aumentandone la qualità del prodotto finale.

La curva di apprendimento in (Wright, 1936) può essere rappresentata dalla seguente formulazione:

$$y_x = y_1 * x^{-b}$$

Dove:

y_x = tempo necessario per lo svolgimento dell'operazione x-esima.

y_1 = tempo per svolgere la prima operazione.

x = numero di ripetizioni.

b = corrisponde alla pendenza della curva, la quale varia in un intervallo di]0; 1[.

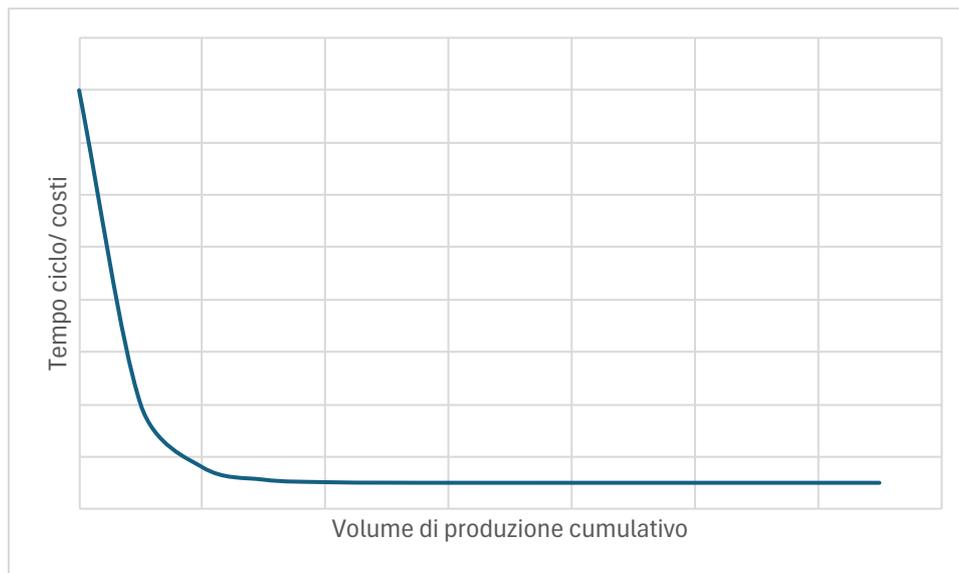


Figura 13: curva di apprendimento di Wright

Si può notare come influisca pesantemente il parametro b sulla forma del grafico, in particolare vengono esclusi i valori estremi:

- se $b=0$, non ci sarebbe alcun apprendimento, di conseguenza, il tempo per lo svolgimento di ciascun task, non sarebbe influenzato dal numero di ripetizioni, infatti $y_x = y_1$;

- se $b=1$, ci si trova nel caso ideale: l'operatore impiega il tempo minimo per lo svolgimento delle sue attività.

In particolare, la pendenza della curva b viene spesso definita come:

$$b = -\frac{\log(p)}{\log(2)} = -\log_2 p$$

dove p è chiamato tasso di apprendimento, ovvero sottolinea il legame che coesiste tra l'incremento delle unità prodotte e il livello di apprendimento. La relazione tra b e p è evidente:

$$p = 2^{-b}$$

ovvero raddoppiando il volume cumulato di produzione, si ottiene un incremento di produttività corrispondente a b . Il modello di Wright sebbene sia approssimativo, viene utilizzato in molti campi. Nella tabella seguente saranno riportati i diversi ambiti di applicazione e il tasso di apprendimento (Tüzün & Tekinerdogan, 2015).

CAMPO DI APPLICAZIONE	TASSO DI APPRENDIMENTO %
Aerspaziale	85
Navale	80-85
Strumenti per macchine complesse	75-85
Fabbricazione ripetitiva di componenti elettronici	90-95
Operazioni ripetitive in macchina o pressa	90-95
Operazioni elettriche ripetitive	75-85
Operazioni ripetitive di saldatura	90
Materie prime	93-96
Parti acquistate	85-88

Figura 14: campi di applicazione e relativi tassi di apprendimento

Qualora si dovesse adattare il modello a dati empirici, viene usato il metodo dei minimi quadrati. Lo scopo, dunque, si riduce a minimizzare la seguente funzione:

$$\min \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2$$

dove:

- n rappresenta il numero di misurazioni effettuate o il numero di periodi misurati;

- y_i è un dato empirico ovvero un valore i -esimo che viene misurato;
- \hat{y}_i rappresenta il valore i -esimo che viene stimato attraverso la curva di apprendimento.

Per riuscire a verificare come la curva di apprendimento approssima i dati reali, viene utilizzato un parametro chiamato indice di determinazione:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

dove:

- \bar{y} rappresenta il valore medio dei dati misurati.

Si può notare come tanto più R^2 assume valori elevati, tanto più la curva di apprendimento riesce ad approssimare meglio i dati empirici.

3.1.1 Limiti del modello di Wright

La curva di apprendimento del modello di Wright, presenta molte limitazioni tra cui:

- con il crescere della produzione, la LC tenderà ad appiattirsi, portando il costo totale a zero. Ciò ovviamente non è consentito perché il singolo operatore, a prescindere dall'esperienza accumulata, impiegherà sempre una quantità di tempo minima, ma non trascurabile, per svolgere la sua mansione;
- nell'equazione di Wright, non vengono considerate eventuali scarti o qualsiasi altra tipologia di difettosità presente nel prodotto finale;
- è trascurata l'esperienza dell'operatore;
- l'equazione di Wright considera solo il fenomeno dell'apprendimento autonomo;
- non viene considerato il fenomeno della dimenticanza.

Attraverso varianti del modello di Wright, è stato possibile riuscire a superare alcuni di questi ostacoli. Ad esempio, grazie al modello a Plateau (PM), si è riusciti a far fronte alla prima limitazione: con l'esperienza di ciascun operatore il tempo necessario per completare la mansione non migliorerà all'infinito, ma

tenderà a stabilizzarsi al tempo nominale previsto in fase di progettazione. Nel capitolo seguente, invece verrà approfondito il fenomeno della dimenticanza.

3.2 Curva di dimenticanza

Un aspetto altrettanto importante e attuale è quello del fenomeno dell'oblio, il quale contraddistingue soprattutto quelle aziende che sono caratterizzate da una produzione a lotti ad intermittenza. Infatti, la produzione può essere sospesa per un certo lasso temporale e poi ripesa. In particolare, tanto maggiore è il tempo che intercorre tra la produzione di una partita di prodotti ed un'altra e la complessità delle attività, tanto più facilmente l'operatore dimentica come deve svolgere efficacemente la sua mansione. In (Bailey, 1989), è stato analizzato come le pause brevi, a differenza di quelle notturne o comunque quelle più lunghe, non abbiano alcun effetto negativo sul processo di assimilazione di nuove mansioni e sul rendimento della persona. Nel breve periodo, è stato dimostrato come la mancanza della sospensione delle attività abbia un risvolto positivo, al contrario, negativo, se invece ci si riferisce ad un intervallo di tempo medio-lungo.

Il fenomeno dell'oblio, presenta una scarsa quantità di documenti in letteratura, poiché si è rivelato complessa la pratica di ottenimento di dati che mettano in relazione la quantità di nozioni dimenticate con il tempo trascorso a non ripeterle. Conoscere la tendenza che un operatore ha di "non ricordare" permette all'azienda di attuare pratiche migliorative nei corsi di formazione. I tre modelli teorici-deterministici più famosi che studiano il fenomeno dell'apprendimento-dimenticanza sono:

1. modello di curva di apprendimento-dimenticanza (LFCM) (M. Y. Jaber, 1996);
2. modello di regressione variabile a dimenticanza variabile (VRVF) (Carlson, 1976);
3. modello di regressione variabile a dimenticanza invariante (VRIF) (ELM'AGH-RABY, 1990).

3.2.1 Modello di curva di apprendimento-dimenticanza (LFCM)

Il modello che rappresenta la curva di apprendimento-dimenticanza (LFCM), si basa su due fattori importanti quali la quantità di esperienza che un

operatore riesce ad acquisire prima che il processo dell'apprendimento venga interrotto, e la durata dell'intervallo temporale di arresto. La forma descritta da questa curva è quella tipica di una curva di potenza. Essa viene determinata dalla seguente formulazione:

$$\hat{T}_x = \hat{T}_1 * x^f$$

Dove:

\hat{T}_x è il tempo necessario per la produzione del x-esimo prodotto dopo un intervallo di arresto, nella curva dell'oblio;

x rappresenta la quantità di prodotto che sarebbe stata realizzata se non si fosse verificata l'interruzione;

\hat{T}_1 è il tempo necessario per realizzare la prima unità della curva di dimenticanza;

f rappresenta la pendenza della curva di dimenticanza.

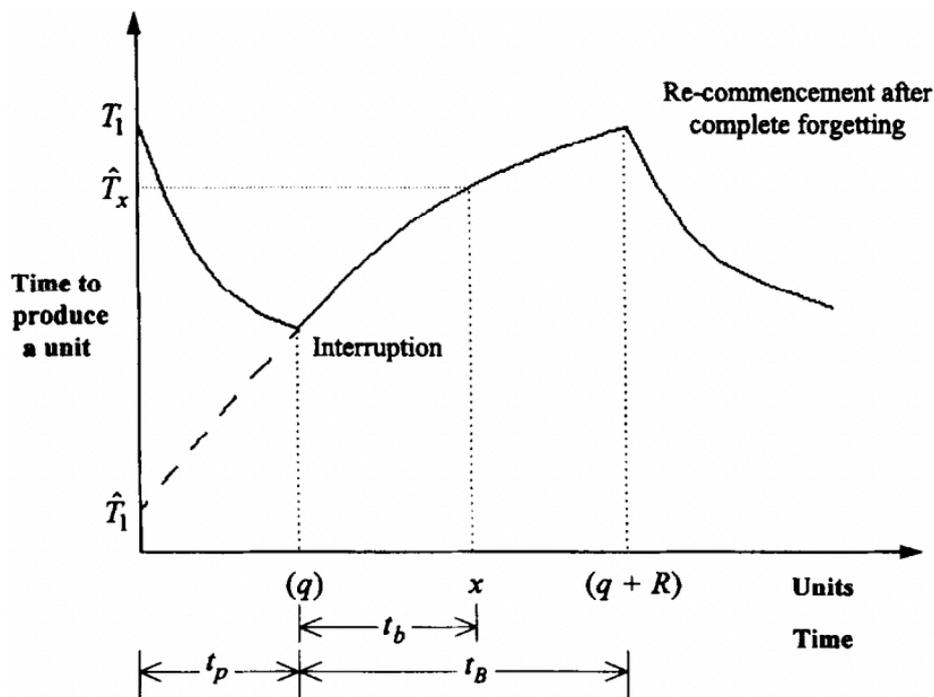


Figura 15: curva apprendimento-dimenticanza (M. Y. Jaber & Bonney, n.d.)

Il grafico può essere suddiviso in tre regioni principali:

- $[0; q]$ avviene il fenomeno dell'apprendimento: l'operatore comincia a imparare la nuova mansione, infatti, il tempo di produzione di un'unità diminuisce all'aumentare del numero di volte che quel compito è stato svolto;

- [q; x] avviene l'interruzione della mansione. In x, il tempo richiesto per produrre la prima unità nel ciclo successivo, è pari a: $\hat{T}_x = T_1 * (a_2 + 1)^{-l}$, dove a_2 sono il numero di unità equivalenti dopo il periodo di interruzione (t_b), mentre, $\hat{T}_x = T_1 * (q + 1)^{-l}$ rappresenta il tempo richiesto per produrre una generica unità x-esima nel ciclo successivo senza nessun arresto;
- [x; q+R]: all'estremo di questo intervallo, il tempo richiesto per produrre la prima unità nel ciclo, corrisponde al T_1 . Ciò accade perché la mansione non è più stata svolta, ed è trascorso un lasso temporale pari a t_B , ovvero al termine di quest'intervallo, l'operatore raggiunge l'oblio totale.

Analizzando quindi il grafico in figura 15, si può facilmente notare come una risorsa umana, dopo una prima fase di apprendimento iniziale, tenda a dimenticare la mansione e quindi a raggiungere l'oblio totale se l'intervallo di tempo che intercorre le due operazioni è molto elevato, ovvero pari a t_B .

3.2.2 Modello a regressione variabile a dimenticanza invariante (VRIF) e variabile (VRVF)

Per descrivere il fenomeno dell'oblio, può essere anche utilizzato un modello simile alla curva di apprendimento chiamato VRVF. In (Carlson, 1976), viene messo in evidenza come l'oblio sia legato non solo al tempo di esecuzione prima della pausa, ma anche alla durata effettiva della sospensione delle attività. Al contrario invece, in (ELM'AGHRABY, 1990) viene evidenziato come il modello VRIF, per descrivere la "tendenza di non ricordare", utilizzi un'unica funzione che abbia la stessa intercetta \hat{T}_1 e il tasso di dimenticanza fisso. Entrambi i modelli si basano sulle stesse ipotesi: la prima è che se avviene l'oblio totale il tempo per lo svolgimento della mansione corrisponde al tempo necessario per elaborare la prima unità senza esperienza; la seconda è che il tempo per lo svolgimento della mansione nella curva di apprendimento corrisponde a quella di oblio. I modelli sopra presentati possono essere confrontati mediante la seguente tabella:

Nome del modello	Funzione	Intercetta di dimenticanza (\widehat{T}_1)	Pendenza della curva (f)
VRIF	$\widehat{T}_x = \widehat{T}_1 * x^f$	fisso	fisso
VRVF	$\widehat{T}_x = \widehat{T}_1 * x^f$	variabile	fisso

3.3 Conclusioni finali

Com'è stato spiegato nei paragrafi precedenti, esistono diversi modelli uni-varianti che possono essere implementati per lo studio dei dati raccolti. In base alla situazione in analisi, avremmo un'equazione matematica differente che riesce a descrivere casi studio (massimizzazione di R^2) diversi. Sebbene il modello di Wright risulti molto semplificato, viene tutt'oggi molto spesso utilizzato.

Gli effetti del learning sono importanti da considerare soprattutto se avvengono delle modifiche nell'ambiente di lavoro (Biskup, 2008), dovute alla riduzione del ciclo di produzione e di vita dei prodotti, come ad esempio l'arrivo di nuovi dipendenti inesperti, la sostituzione di vecchi macchinari con quelli nuovi e più prestanti, nuove mansioni dovute all'accettazione di incarichi lavorativi mai svolti prima... Analizzare le learning curve, quindi, consente di aumentare la qualità del prodotto finale e i volumi di produzione, diminuire i costi e quindi anche i tempi di svolgimento dei task e anche di consentire l'utilizzo di politiche di continuo miglioramento.

Le curve di apprendimento-dimenticanza sono necessarie poiché, affiancandole ai dati raccolti, consentono non solo di conoscere la capacità che ciascun operatore ha di apprendere una nuova mansione, ma anche di prevedere le prestazioni lavorative di ciascun operaio. Grazie a quest'analisi, è possibile attribuire a ciascun lavoratore una mansione proporzionale alle sue capacità di apprendimento. Ad esempio, in (Nembhard, 2000), vengono assegnati compiti di lunga

durata a tutti i dipendenti che imparano più lentamente, al contrario invece, agli operatori caratterizzati da una LC con pendenza elevata, vengono affidati tutti quei task che, con maggiore frequenza, vengono cambiati. Grazie a ciò si riesce ad aumentare l'efficienza della linea di produzione, aumentandone così la performance globale.

4 CASO APPLICATIVO

4.1 Modello matematico: effetto del learning

In questo sotto capitolo, viene proposto un modello, il quale consente di confrontare la soluzione FW con una WW in termini di produttività andando a considerare l'effetto del learning.

È importante analizzare il fenomeno dell'apprendimento quando si parla dei tempi che gli operatori impiegano per compiere attività diverse (Bukchin & Cohen, 2013). Quando viene introdotto un nuovo prodotto con task nuovi, i due sistemi avranno tempi di reattività ben diversi, e il learning influenzerà in modo diverso la produttività delle due configurazioni.

Infatti, è stato stimato che il tempo del primo ciclo può durare dalle tre alle quindici volte il tempo standard di una stazione.

Il modello che andremo a utilizzare è stato proposto in (Zennaro et al., 2023). Esso considera due linee di assemblaggio (una FW, l'altra una WW) entrambe non possiedono buffer e utilizzano un bilanciamento di tipo SALBP-2: dato un numero di stazioni m , il tempo di ciclo è ridotto al minimo o la velocità di produzione è massimizzata. In particolare, ogni qualvolta la soluzione a operatori fissi, il cui tempo di ciclo è dettato dalla stazione più lenta (collo di bottiglia), deve essere ribilanciata, si cerca di ridurre i tempi delle inattività. Il layout usato per la FW è lineare mentre, per la WW, è utilizzata la strategia a Rabbit Chase in una disposizione a U. I tempi, impiegati da ciascun operatore per lo svolgimento delle attività (concetto che comprende sia un compito di assemblaggio che uno di prelievo), sono deterministici (t_j) e le distanze tra le diverse postazioni è costante ($D = 3m$) proprio come la velocità di ogni dipendente ($v = 1 \text{ m/s}$). A tutti i lavoratori viene attribuita una sola attività, e ad ogni task è associato un singolo componente. Tutti i dipendenti possiedono lo stesso livello di abilità e ognuno è in grado di svolgere tutti i compiti in entrambe le configurazioni.

In condizioni target, entrambe le linee di assemblaggio sono bilanciate su potenzialità di produzione pari a $Q = Q_{target}$ e possiedono lo stesso numero di stazioni di lavoro (k), operatori (OP) e numero di tasks (n).

Per indagare l'effetto del learning sulle due linee di produzione, è possibile utilizzare un parametro che esprime il tempo per il raggiungimento delle condizioni standard per entrambe le configurazioni: Tm_{tot}^{FW} e Tm_{tot}^{WW} . Prima di introdurre la loro formulazione, è necessario definire altri indici che concorrono alla loro formulazione.

Partendo dal presupposto in cui, nella situazione di partenza, gli operatori non conoscano i tasks, il tempo dello svolgimento dell'attività j-esima nel modello di Wright, precedentemente discusso nel Cap.3.1, viene definito come segue:

$$t_j = t_{1,j} * n_j^{-b_j} \quad [s]$$

Dove: n_j = numero di ripetizioni per raggiungere il tempo di esecuzione target dell'attività j, $t_{1,j}$ = tempo necessario, in secondi, richiesto dall'operatore per lo svolgimento dell'attività j-esima per la prima volta e b_j = è la costante di apprendimento del compito.

Per calcolare $t_{1,j}$, in (E. M. , A. K. , & G. I. Dar-El, 1995) viene utilizzata una formula empirica, la quale esprime $t_{1,j}$ come funzione di φ_j (pendenza dell'apprendimento del compito j la quale in (E. M. Dar-El, 2000) viene definita come $\varphi_j = 100 * 2^{-b_j}$) e t_j :

$$t_{1,j} = (53,68 - 0,57\varphi_j) * t_j \quad [s]$$

Per ottenere Tm_{tot}^{FW} e Tm_{tot}^{WW} , si devono prima calcolare i tempi totali necessari ad apprendere un task e l'influenza dell'apprendimento sulla produttività, poi, in un secondo momento, i tempi totali che vengono impiegati durante la lavorazione completa del pezzo, in condizioni target. Da ciò si ottiene il tempo totale richiesto per lo svolgimento di n_j , (ovvero il tempo richiesto all'operatore per imparare la mansione), in (Camm, 1987), è pari a:

$$T_{m,j} = \int_0^n t_j * (n_j)^{-b_j} = \frac{t_{1,j} * (n_j)^{1-b_j}}{1 - b_j} \quad [s]$$

Nelle due casistiche considerate, i valori della quantità di tempo richieste per lo svolgimento del numero di ripetizioni per raggiungere il tempo target dell'attività j-esima, vengono individuati in due modi differenti:

- a. per le FW il tempo totale di lavorazione target della linea (in secondi) è: $Tm_{tot}^{FW} = \max(T_{m,k})$, dove $T_{m,k}$ è la somma di tutti i $T_{m,j}$ dei

- compiti assegnati alla stazione k, in secondi. In pratica in una FW, la linea produce ad una velocità pari a quella della stazione più lenta;
- b. per le WW, il tempo totale impiegato per svolgere tutti gli n compiti in condizioni target (in secondi) è: $Tm_{tot}^{WW} = \sum_{j=1}^n (T_{m,j}) + k * \frac{D}{v} * n^{WW}$, dove n^{WW} rappresenta il numero di volte che queste attività devono essere ripetute per raggiungere le condizioni target. Ciò significa che la linea produce ad una velocità pari alla somma di tutte le attività svolte da ogni singolo operatore.

Per valutare l'effetto dell'apprendimento sulla produttività nella linea di assemblaggio, vado a definire un nuovo indice che rappresenta il parametro di flessibilità del volume di produzione:

$$PV\% = \frac{Q}{Q_{target}}$$

Come conseguenza si nota che se:

- $PV\% = 100\%$ allora $Q = Q_{target}$ dunque la linea di assemblaggio sta lavorando in condizioni target;
- $PV\% < 100\%$ allora i volumi di produzione sono inferiori rispetto a quelli definiti dalla condizione target ($Q < Q_{target}$). Ciò implica che il numero di operatori richiesti per entrambe le linee di produzione sia inferiore e quindi la FW necessita anche di un minor numero di stazioni k-esime.

4.2 Caso applicativo: dati

Lo scopo principale di questo esercizio è quello di individuare quale configurazione sia preferibile tra la Fixed Worker e la Walking Worker facendo variare il parametro di flessibilità del volume di produzione. Cambiando il PV%, si valuta quanto le due configurazioni siano produttive ed efficienti rispetto ad un'alterazione dei volumi di produzione. Verrà successivamente dimostrato come la convenienza delle soluzioni possa mutare al variare dei parametri di confronto utilizzati.

Il caso considerato ha una produttività target pari a $Q_{target} = 6 \text{ pz/h}$ e un tempo di ciclo $T_c = 600 \text{ s/pz}$. Il prodotto medio è fatto da 11 task per un tempo

complessivo di assemblaggio di 2820 secondi (circa 50 min). Pertanto, la linea di assemblaggio sarà costituita da sei stazioni di lavoro (K) alle quali viene assegnato un certo numero di task da svolgere per garantire la produttività richiesta (tabella 1).

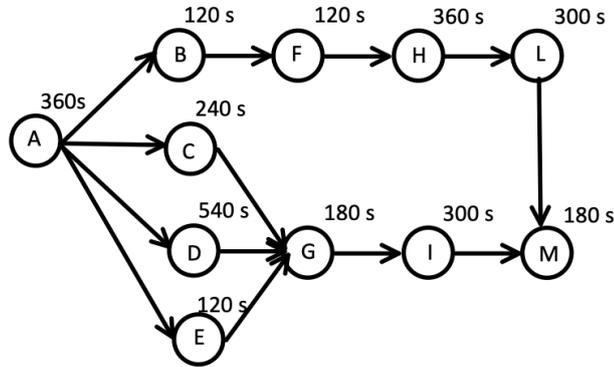


Figura 16: diagramma delle precedenze del caso pratico

	Stazione 1	Stazione 2	Stazione 3	Stazione 4	Stazione 5	Stazione 6
Task	A-E	D	B-C-F	H	G-I	L-M
Tempo [s/pz]	480	540	480	360	480	480
Ozio [s]	60	0	60	180	60	60

Tabella 1: bilanciamento e tempi di ozio con $PV\%=100\%$

Inizialmente per entrambe le configurazioni ad ogni stazione è associato un operatore. È possibile notare che, come già nella situazione di partenza, la linea di produzione presenti stazioni di assemblaggio caratterizzate da velocità molto diverse tra loro (Tabella 1): la stazione 4 ha una produttività complessiva $T^{staz 4} = 360 s/pz$, invece la stazione 2 ha una $T^{staz 2} = 540 s/pz$. La produttività della linea FW, pertanto, sarà determinata proprio dalla stazione 2, ovvero la stazione più lenta, mentre nel sistema WW dato che un operatore fa tutte le stazioni, non deve attendere per passare alla successiva.

La tabella 2 riporta i principali dati relativi ai task, ovvero la stazione di appartenenza, il tempo nominale t_j , il tempo di esecuzione del task al primo tentativo $t_{1,j}$, e i valori di b_j e φ_j di ogni task.

Task j-esimo	t_j	Workstation	φ_j	b_j	$t_{1,j}$
A	360	1	88	0,18	1267,2
B	120	3	81	0,30	901,2
C	240	3	86	0,22	1118,4
D	540	2	76	0,40	5594,4
E	120	1	75	0,42	1311,6
F	120	3	83	0,27	764,4
G	180	5	87	0,20	736,2
H	360	4	85	0,23	1882,8
I	300	5	75	0,42	3279,0
L	300	6	90	0,15	714,0
M	180	6	85	0,23	941,4

Tabella 2: dati del problema

Le attività che devono essere svolte da ciascun operatore sono tanto più complesse, tanto più l'indice di pendenza dell'apprendimento del compito j-esimo (φ_j) risulterà essere basso. È possibile notare come la learning slope abbia un intervallo che varia da un valore di 75 a 90, caso in cui i tasks risultino essere ripetitivi e più semplici. Considerando due attività con tempi di lavorazione nominali uguali ma φ_j diversi (come i task I e L), il tempo richiesto dall'operatore per svolgere la mansione per la prima volta, $t_{1,j}$ è maggiore nel task più complesso (ovvero con φ_j più basso). Prima di procedere con la risoluzione del problema, è necessario fare qualche altra considerazione:

- a. nel caso in cui PV%=100%, ogni operatore a cui è assegnato una stazione non è in grado di svolgere alcuna operazione;
- b. quando vengono tolte le stazioni ci si riferisce sempre alla configurazione con PV%=100%.

4.2.1 Bilanciamenti

Ciascun caso che verrà in seguito analizzato inizierà con il bilanciamento della linea come dato in input e lo scopo sarà quello di minimizzare i tempi delle inattività. Ad ogni stazione vengono assegnate un insieme di compiti che dovranno essere svolti in ciascuna postazione. Di seguito vengono riportati i ribilanciamenti della linea, necessari alla configurazione FW qualora si verificassero delle variazioni di produttività, i tempi di ciclo T_c e le relative potenzialità ideali di entrambe le configurazioni Q_{id}^{FW} e Q_{id}^{WW} (ovvero le velocità che le due linee

possiederebbero in condizioni target) per ciascun caso. È necessario ricordare che i tempi di ciclo qui riportati vengono utilizzati solo per bilanciare il carico di lavoro tra le stazioni di assemblaggio. Infatti, il ritmo di produzione della soluzione FW è dettato dalla stazione più lenta, mentre quello della WW è determinato dalla velocità di produzione del singolo operatore per il numero di dipendenti. Non è sorprendente quindi che le produttività ideali, di entrambe le configurazioni, non coincidano con la potenzialità Q usata per equilibrare i tempi di lavoro di ogni stazione.

PV%=100%		PV%=100% Stazione					
Q	6 pz/h	1	2	3	4	5	6
T_c	600 s/pz	Task	A E	D	B C F	H	G I L M
Q_{id}^{FW}	6,7 pz/h	Tempo stazione [s/pz]	480	540	480	360	480
Q_{id}^{WW}	7,6 pz/h						

Tabella 3: bilanciamento della linea con PV%=100%

PV%=80%		PV%=80% Stazione					
Q	4,8 pz/h	1	3	4	5	6	
T_c	750 s/pz	Task	A B	C E F	D G	H I L M	
Q_{id}^{FW}	5,0 pz/h	Tempo stazione [s/pz]	480	480	720	660	480
Q_{id}^{WW}	6,4 pz/h						

Tabella 4: bilanciamento della linea con PV%=80%

PV%=60%		PV%=60% Stazione			
Q	3,6 pz/h	1	3	5	
T_c	1000 s/pz	Task	A B F H	D E L C G I M	
Q_{id}^{FW}	3,75 pz/h	Tempo stazione [s/pz]	960	960	900
Q_{id}^{WW}	3,82 pz/h				

Tabella 5: bilanciamento della linea con PV%=60%

PV%=40%		PV%=40% Stazione		
Q	2,4 pz/h	1	3	
T_c	1500 s/pz	Task	A B E F H L C D G I M	
Q_{id}^{FW}	2,5 pz/h	Tempo stazione [s/pz]	1380	1440
Q_{id}^{WW}	2,55 pz/h			

Tabella 6: bilanciamento della linea con PV%=40%

PV%=20%		PV%=20% Stazione	
Q	1,2 pz/h	1	
T_c	3000 s/pz	Task	tutti
Q_{id}^{FW}	1,277 pz/h	Tempo stazione [s/pz]	2820
Q_{id}^{WW}	1,275 pz/h		

Tabella 7: bilanciamento della linea con PV%=20%

Osservando come variano Q_{id}^{FW} e Q_{id}^{WW} nelle tabelle sopra riportate, è possibile notare come la velocità ideale di produzione della linea (ovvero quella

ottenuta senza considerare l'effetto del learning) a operatori mobili, sia maggiore rispetto alla FW quando PV% corrisponde al 100%, 80%, 60% e al 40%. Ciò accade perché la fixed worker, in quei casi, è fortemente sbilanciata (soprattutto quando PV% è pari al 100% e 80% in cui la ΔQ_{id} delle due configurazioni è dell'ordine di 1 o 1,5 pz/h) e questo influisce negativamente sulla produttività. Al contrario invece, la linea WW ha una velocità di produzione minore della soluzione complementare, quando il PV% è pari al 20% poiché il coefficiente di utilizzo degli operatori è del 100%.

Avendo capito la centralità del bilanciamento, di seguito verranno analizzati tempi di ozio delle stazioni più veloci di ciascun caso per la configurazione a operatori fissi. Questo squilibrio dei tempi richiesti da ogni stazione per lo svolgimento dei task viene messo in risalto negli istogrammi riportati nella figura 17.

Quando PV%=100%, dall'istogramma dei bilanciamenti, è possibile notare come la stazione più veloce (4) lavori a $T^{staz\ 4} = 360\ s/pz$, mentre quella più lenta a $T^{staz\ 2} = 540\ s/pz$. Questo consente alla postazione di assemblaggio 4 di ozio per il 33% del tempo che ha a disposizione. Se il PV%=80%, la stazione 4, per completare tutte le attività a regime, impiega un tempo complessivo pari a 720 s. Al contrario invece, le stazioni più veloci (1 – 3 – 6), richiedono solo 480 s. Associando alla linea un tempo di ciclo $T_c = 720\ s/pz$, le workstation 1 – 3 – 6 ozieranno per circa 240 s ovvero per il 33% del tempo totale che hanno a disposizione per lavorare.

Quando il rapporto tra Q e Q_{target} è pari al 60%, allora nella linea di assemblaggio, c'è un migliore bilanciamento, infatti, il coefficiente di utilizzo della linea stessa, sarà maggiore rispetto ai casi precedenti: 94%. A mano a mano che il PV% decresce, è possibile verificare come l'utilizzo degli operatori aumenti. Infatti, a ciascuna stazione vengono assegnati un numero maggiore di task. Il rapporto tra il tempo oziato dalle stazioni più veloci e il tempo di ciclo, dettato dalla stazione a collo di bottiglia, è pari al 4% e allo 0% rispettivamente nei casi in cui il PV% è pari al 40% e al 20%.

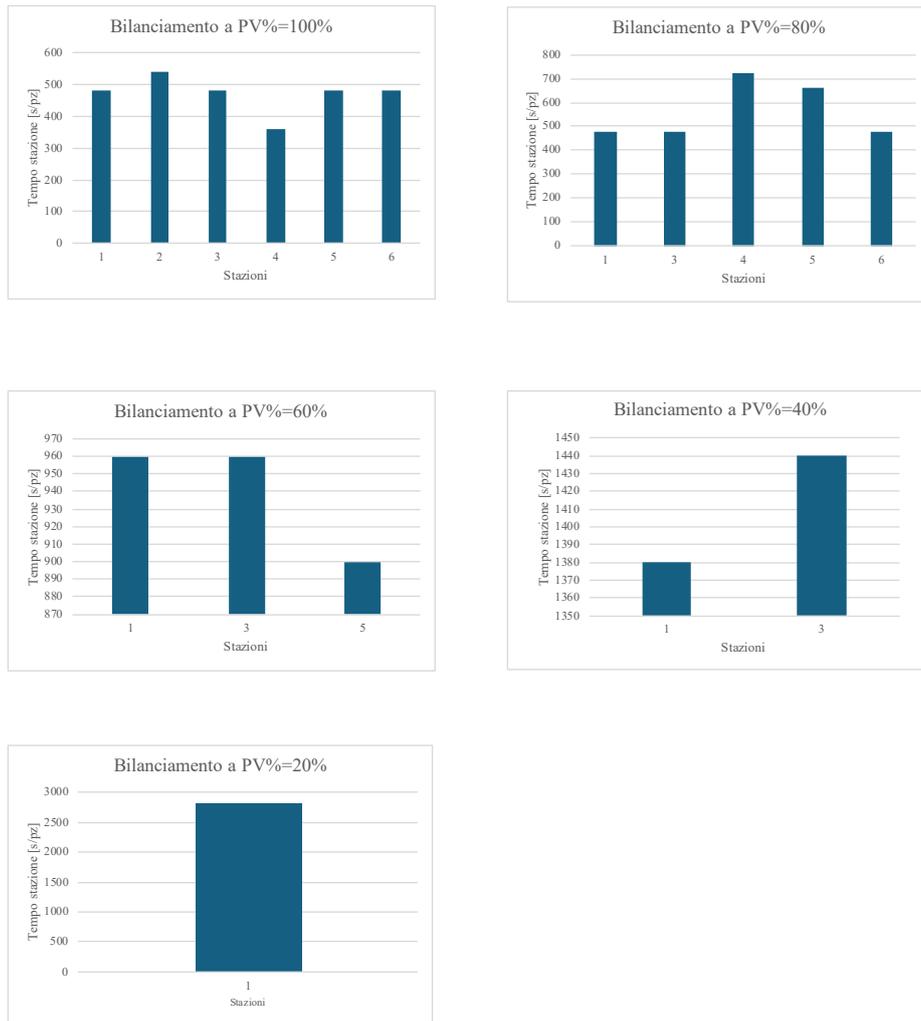


Figura 17: istogramma dei bilanciamenti di ciascun caso

4.2.2 Parametri usati per la risoluzione del caso applicativo

INDICE	SIGNIFICATO	FORMULA
$x_{j,i}$	Variabile dicotomica che indica se un'attività j viene svolta o meno in una stazione i-esima.	$x_{j,i} = 0;1$

$y_{j,i}$	Variabile dicotomica che indica tutte le nuove attività j-esime assegnate alla i-esima stazione di lavoro.	$y_{j,i} = 0;1$
$z_{j,i}$	Variabile dicotomica che indica tutte le attività j che la stazione i-esima sa già fare.	$z_{j,i} = 0;1$
$t_{1,i}$	Tempo totale impiegato nella stazione i-esima per svolgere tutte le attività: sia quelle “nuove” che quelle “vecchie”.	$\sum_{j=A}^M t_{1,j} * y_{j,i} + \sum_{j=A}^M t_j * z_{j,i}$
$t_{nom,i}$ [s]	Tempo nominale di svolgimento di tutte le attività di una stazione i-esima.	$\sum_{j=A}^M t_j * x_{j,i}$
$Q_{id,i}$ [pz/h]	Potenzialità ideale della stazione i-esima.	$\frac{3600}{t_{nom,i}}$
Q_{id}^{FW} [pz/h]	Potenzialità ideale della soluzione FW.	$\min(Q_{id,i})$
Q_{id}^{WW} [pz/h]	Potenzialità ideale della soluzione WW (dove OP=numero di operatori, mentre $t_{spostam,i} = 3s$ uguale a tutte le stazioni).	$\frac{3600 * OP}{\sum_{j=A}^M t_{nom,j} + \sum_{j=A}^M t_{spostam,j}}$

n_i^*	Numero di ripetizioni n_j massime tra le nuove attività che vengono assegnate ad un operatore per riuscire a raggiungere le condizioni target.	$max(n_j * y_{j,i})$
n_{FW}^*	Numero di ripetizioni necessario alla soluzione con FW per raggiungere le condizioni di regime.	$max(n_i^*)$
n_{WW}^*	Numero di ripetizioni necessario alla soluzione con WW per raggiungere le condizioni di regime.	Tranne che nella situazione di PV%=100%, il $n_{WW}^* = 0$ perché gli operatori sanno già svolgere tutte le attività.
$Tm_i(h)$ [h]	Tempo che l'operatore impiega a fare n^* le attività assegnate alla stazione.	$\frac{n^* \sum_j t_j * z_{j,i} + \sum_j Tm_j * y_{j,i}}{3600}$
Tm_{tot}^{FW} [h]	Numero di ore totali che il FW impiega ad arrivare a regime.	$max(Tm_i(h))$
Tm_{tot}^{WW} [h]	Numero di ore totali che il WW impiega ad arrivare a regime.	Tranne che nella situazione di PV%=100%, il $Tm_{tot}^{WW} = 0$ perché gli operatori sanno già svolgere tutte le attività.
$Q_{Tm,i}$ [pz/h]	Velocità della stazione, ovvero il numero di pezzi prodotti rispetto al tempo impiegato dall'operatore per lo svolgimento degli n^* tasks.	$\frac{n_i^*}{Tm_i(h)}$

Q_{Tm}^{FW} [pz/h]	Indica la produttività della FW durante la fase di apprendimento.	$\min(Q_{Tm,i})$
Q_{Tm}^{WW} [pz/h]	Indica la produttività della WW durante la fase di apprendimento.	Q_{id}^{WW}

Un ulteriore parametro usato per il confronto viene calcolato come segue:

$$Q_{Tm \max,i} = \frac{n_i^* + [(\max(Tm_{tot}^{FW}; Tm_{tot}^{WW}) - Tm_i(h)) * Q_{id,i}]}{\max(Tm_{tot}^{FW}; Tm_{tot}^{WW})} \quad [pz/h]$$

Questo accade perché sia Q_{Tm}^{FW} che Q_{Tm}^{WW} rappresentano le velocità medie di produzione della linea durante la fase di apprendimento. L'utilità di questo nuovo indice risulta particolarmente evidente nel caso base (ovvero con PV%=100%): infatti, si osserva che Q_{Tm}^{FW} è pari a 4 pz/h, mentre Q_{Tm}^{WW} raggiunge i 7,4 pz/h. Tuttavia, queste due velocità si riferiscono a intervalli di tempo significativamente diversi: $Tm_{tot}^{FW} = 202,2h$, mentre $Tm_{tot}^{WW} = 959,1 h$, il che impedisce un confronto diretto tra i due parametri.

Come per $Q_{Tm,i}$ è stato possibile calcolare Q_{Tm}^{FW} e Q_{Tm}^{WW} , lo stesso può essere fatto per $Q_{Tm \max,i}$:

- per la soluzione con FW: $Q_{Tm \max}^{FW} = \min(Q_{Tm \max,i})$;
- per la soluzione con WW: $Q_{Tm \max}^{WW} = Q_{Tm}^{WW}$.

4.3 Caso applicativo: analisi dei risultati ottenuti

Nel problema se non viene considerato l'effetto del learning, comparando le due configurazioni attraverso le velocità ideali di produzione (vedi tabella 8), la soluzione a operatori fissi è preferibile solo quando il rapporto tra Q e Q_{target} corrisponde al 20%. Tutto questo accade perché lo sbilanciamento della linea a operatori fissi influisce negativamente sull'indice di efficienza globale.

Il caso a PV%=100% è stato considerato come caso base nello svolgimento dell'esercizio. Successivamente verrà dimostrato come al variare del PV%,

considerando l'effetto dell'apprendimento, anche la scelta della configurazione più adeguata varia.

Questo significa che quando $Q = Q_{target}$ i lavoratori svolgono le attività per la prima volta al tempo $t_{1,j}$. Nei casi successivi, ovvero quando $PV\% < 100\%$ nella configurazione FW, tutti i compiti che erano stati precedentemente assegnati nella configurazione iniziale, possono essere direttamente svolti dagli operatori al tempo t_j . Al contrario, invece, tutte le nuove mansioni vengono eseguite sempre al tempo $t_{1,j}$. Ogni qualvolta avvenga un ribilanciamento la soluzione a operatori fissi necessita di un intervallo di tempo prima di raggiungere i tempi di esecuzione target dei task. Il periodo dell'apprendimento, quindi, influisce negativamente sulla produttività della linea, poiché è inevitabile che vada a causare dei rallentamenti.

In particolare, l'effetto del learning influenza i due sistemi in modo diverso, soprattutto quando la produttività è fluttuante. I sistemi WW funzioneranno meglio quando $PV\% < 100\%$ poiché, nel caso base ($PV\% = 100\%$), gli operatori sono più lenti dato che devono imparare tutte le attività all'inizio; tuttavia, quando avviene un cambiamento dei volumi di produzione, tutti i lavoratori sono già in grado di eseguire tutte le attività (infatti per ogni $PV\% \neq 100\%$, Tm_{tot}^{WW} è nullo come riportato nella tabella 8). Invece, i sistemi FW avranno prestazioni migliori quando i volumi di produzione corrispondono a quelli target poiché gli operatori devono imparare meno task e il sistema risulta quindi essere più produttivo.

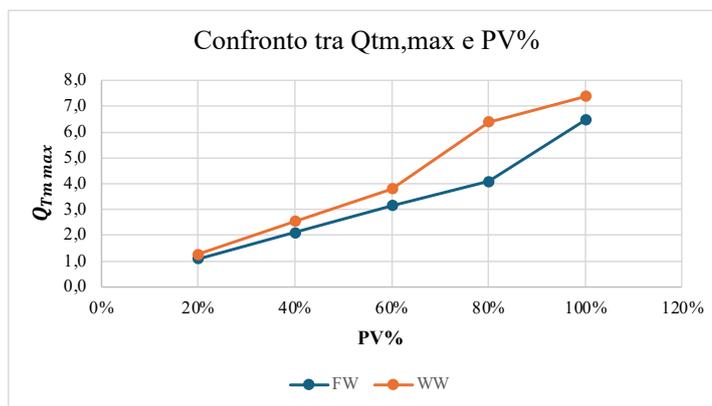


Figura 18: grafico di confronto con parametro $Q_{Tm,max}$

Al contrario di ciò che si possa pensare, la soluzione della WW, nel caso applicativo sopra descritto, risulterà essere preferibile rispetto alla FW per ogni

PV% (vedi figura 18). È possibile notare come, più il rapporto tra Q e Q_{target} si abbassa, tanto più $Q_{Tm\ max}^{FW}$ tenderà ad assumere valori sempre più simili a $Q_{Tm\ max}^{WW}$ senza però mai superarla. Nel grafico della figura 18, la WW ha sempre una velocità di produzione media, durante il periodo di apprendimento, superiore alla FW: la differenza comincia a essere quasi irrisoria nel caso in cui PV%=20%. Ciò accade perché la linea FW è più bilanciata quando PV% assume valori più bassi: il coefficiente di utilizzo degli operatori a PV% pari a 60%, 40%, 20% corrisponde rispettivamente al 94%, 96% fino ad arrivare al 100%.

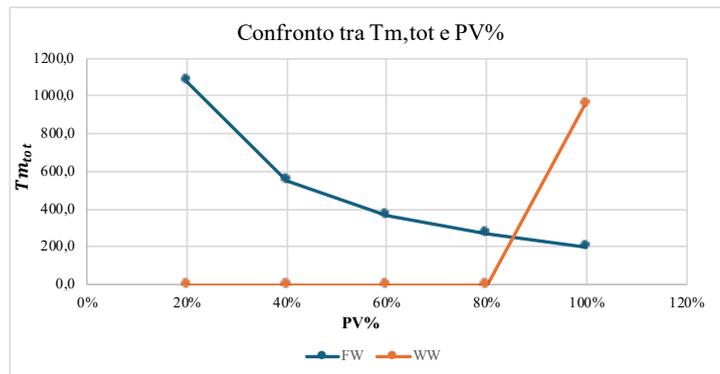


Figura 19: grafico di confronto con parametro $T_{m,tot}$

Quando $Tm_{tot}^{FW} < Tm_{tot}^{WW}$, significa che il tempo impiegato dalla FW per raggiungere le condizioni standard, risulta essere inferiore e quindi la soluzione preferita è quella con operatori fissi.

Dalla figura 19, si può notare come, usando il parametro di confronto $T_{m,tot}$, la WW sia la soluzione preferibile in quasi tutti i casi tranne quando PV%=100%. Ciò è dovuto dal fatto che ciascun operatore deve imparare ogni attività e quindi la soluzione a operatori mobili impiegherà un intervallo di tempo elevato per il raggiungimento delle condizioni standard, non a caso $Tm_{tot}^{WW} = 959,1 h$ a mentre la soluzione a operatori fissi necessiterà di tempo pari a $Tm_{tot}^{FW} = 202,2 h$.

I valori ottenuti dalla risoluzione dell'esercizio vengono brevemente riassunti in questa tabella:

PV%	Q_{id}^{FW} [pz/h]	Q_{id}^{WW} [pz/h]	$Q_{Tm\ max}^{FW}$ [pz/h]	$Q_{Tm\ max}^{WW}$ [pz/h]	Tm_{tot}^{FW} [h]	Tm_{tot}^{WW} [h]
100%	6,7	7,6	6,5	7,4	202,2	959,1
80%	5,0	6,4	4,1	6,4	271,7	0,0
60%	3,750	3,818	3,2	3,8	367,9	0,0
40%	2,500	2,548	2,1	2,5	550,5	0,0
20%	1,277	1,275	1,1	1,3	1081,6	0,0

Tabella 8: confronto delle configurazioni FW e WW variando PV%

Sebbene nella soluzione ideale è stato constatato che la FW sia preferibile solo quando PV%=20%, considerando l'effetto dell'apprendimento sugli operatori, è stato possibile notare come la convenienza delle due configurazioni, non sia univocamente determinata. Infatti, rispetto ai risultati di confronto, ottenuti precedentemente, si può apprezzare un'apparente discrepanza, la quale però può essere facilmente spiegata ricordando che i parametri utilizzati per il confronto sono di natura differente: nel primo caso abbiamo valutato la convenienza delle due soluzioni focalizzandoci su un parametro di velocità, influenzato in parte anche dal T_m , mentre nel secondo caso ci si focalizza solo sui tempi necessari alle linee per riuscire a raggiungere le rispettive condizioni target.

In conclusione, non esiste un parametro migliore dell'altro, ma in base all'interesse o all'obiettivo che l'azienda si prefissa di raggiungere, viene utilizzato come conseguenza l'indice più adeguato che gli consenta ad esempio o di massimizzare la velocità di produzione media nel periodo di apprendimento oppure di minimizzare l'indice T_m .

CONCLUSIONI

In questo elaborato è stato possibile rilevare come l'effetto del learning influenzi la scelta della configurazione ideale, a operatori fissi o mobili, per una linea di assemblaggio al variare dei volumi di produzione. Ciascuna soluzione presenta caratteristiche generali ben distinte:

- le FW necessitano di un numero di operatori pari al numero di stazioni. Ciò rappresenta un'importante limitazione dal momento in cui, qualora la domanda di mercato fosse diversa rispetto alla potenzialità in uscita della linea, sarebbe necessaria una modifica del layout e un ribilanciamento. In aggiunta, però, la configurazione a operatori fissi impiega un intervallo di tempo minore al raggiungimento delle condizioni target in quanto gli operatori devono apprendere un numero più ristretto di mansioni;
- le WW sono molto flessibili in termini di variazione dei volumi di produzione rispetto alla condizione standard. Questo accade perché non è strettamente necessario che il numero di operatori sia pari al numero di stazioni. In linea di massima ogni lavoratore svolge tutti i task richiesti per il completamento del prodotto da cui ne consegue, nella fase iniziale, un impatto più rilevante del learning e costi più elevati.

Sebbene il caso numerico presenti molte ipotesi semplificative, si è riuscito a mettere in evidenza come, utilizzando parametri differenti, si sono talvolta ottenuti risultati contrastanti. Ciò accade per il fatto che ciascun indice si focalizza su un aspetto diverso: spetterà all'azienda utilizzare quello più consono per il raggiungimento degli obiettivi prefissati.

Sia nel caso in cui venga considerato l'effetto del learning, sia in quello ideale, è emerso come la soluzione a operatori fissi, sia fortemente influenzata dal bilanciamento della linea: se tutte le stazioni lavorassero alla stessa velocità, allora la linea FW sarebbe la configurazione più veloce (in ogni postazione di assemblaggio, l'operatore non ozia e non deve spostarsi). La soluzione WW, invece è generalmente meno efficiente quando il PV% è pari al 100%. Infatti, l'intervallo di tempo che la linea a operatori mobili impiega a raggiungere la condizione di

produttività target è elevato perché tutti gli operatori devono imparare tutte le mansioni. In aggiunta è importante sottolineare il fatto che queste considerazioni sono state elaborate sulla base dei risultati ottenuti dal caso applicativo. Se avessimo avuto dataset differente, soprattutto legato al bilanciamento dell'impianto, si sarebbero potuti ottenere esiti diversi.

BIBLIOGRAFIA

- Adler, P. S. (1991). Behind the learning curve: A sketch of the learning process. *Management Science*, 267–281.
- Al-Zuheri, A., Luong, L., & Xing, K. (2016). Developing a multi-objective genetic optimisation approach for an operational design of a manual mixed-model assembly line with walking workers. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27(5), 1049–1065. <https://doi.org/10.1007/s10845-014-0934-3>
- Bailey, C. D. (1989). Forgetting and the learning curve: A laboratory study. *Management Science*.
- Becker, C., & Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 694–715. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.023>
- Biskup, D. (2008). A state-of-the-art review on scheduling with learning effects. *European Journal of Operational Research* 188.2, 315–329.
- Bortolini, M., Faccio, M., Galizia, F. G., Gamberi, M., & Pilati, F. (2021). Walking workers systems: A sequence analysis for flexible mixed model lines. *IFAC-PapersOnLine*, 54(1), 601–606. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.171>
- Bratcu, A. I., & Dolgui, A. (2009). Some new results on the analysis and simulation of bucket brigades (self-balancing production lines). *International Journal of Production Research*, 47(2), 369–387. <https://doi.org/10.1080/00207540802426128>
- Bukchin, Y., & Cohen, Y. (2013). Minimising throughput loss in assembly lines due to absenteeism and turnover via work-sharing. *International Journal of Production Research*, 51(20), 6140–6151. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.807374>
- Calzavara, M., Faccio, M., Finco, S., Persona, A., & Zennaro, I. (2022). Influence of task time variation in adopting Walking Worker assembly systems: a design approach. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 91–96. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.373>

- Calzavara, M., Faccio, M., Persona, A., & Zennaro, I. (n.d.). *Walking worker vs fixed worker assembly considering the impact of components exposure on assembly time and energy expenditure*. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06438-9>/Published
- Camm, J. D. , J. R. E. and N. K. W. (1987). The unit learning curve approximation of total cost. *Computers & Industrial Engineering*.
- Carlson, J. G. (1976). How much does forgetting cost. *Industrial Engineering*, 40–47.
- Cevikcan, E. (2016). An optimization methodology for multi model walking-worker assembly systems: An application from busbar energy distribution systems. *Assembly Automation*, 36(4), 439–459. <https://doi.org/10.1108/AA-09-2015-072>
- Dar-El, E. M. (2000). Human learning: From learning curves to learning organizations. *Kluwer Academic*.
- Dar-El, E. M. , A. K. , & G. I. (1995). Predicting performance times for long cycle time tasks. *IIE Transactions*, 272–281.
- Ebbinghaus, H. (1885). *Über das gedächtnis: untersuchungen zur experimentellen psychologie*.
- ELM'AGHRABY, S. E. (1990). Economic manufacturing quantities under conditions of learning and forgetting . *Production Planning & Control*, 196–208.
- Engele Elisabeth, H., Kyvsgård, P. H., Boer, H. E., & Hansen, P. H. (2013). *Aalborg Universitet Product modularity and its effects on firm performance Operationalisation and Measurement PRODUCT MODULARITY AND ITS EFFECTS ON FIRM PERFORMANCE: OPERATIONALISATION AND MEASUREMENT*. <http://www.continuous-innovation.net/>
- Esmaeilian, G. R. (2015). *Assembly Line and Balancing Assembly Line*.
- Jaber, M. Y. (1996). *Production breaks and the learning curve: the forgetting phenomenon*. *Applied mathematical modelling*. 162–169.
- Jaber, M. Y. , and A. L. G. (2004). Learning curves for processes generating defects requiring reworks. *European Journal of Operational Research* .
- Jaber, M. Y., & Bonney, M. (n.d.). *A comparative study of learning curves with forgetting*.

- Lage Junior, M., & Godinho Filho, M. (2010). Variations of the kanban system: Literature review and classification. In *International Journal of Production Economics* (Vol. 125, Issue 1, pp. 13–21). <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.01.009>
- Levy, F. K. (1965). Adaptation in the production process. *Management Science*.
- Lievens, F. (2009). *Factors Affecting the Learning Effect in the Production Environment of ASML Suppliers*.
- Lolli, F. (2016). Modelling production cost with the effects of learning and forgetting. *IFAC-PapersOnLine* .
- Nembhard, D. A. , and M. V. Uzumeri. (2000). An individual-based description of learning within an organization. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 370–378.
- Rekiek, B. and A. D. (2006). *Assembly line design: the balancing of mixed-model hybrid assembly lines with genetic algorithms*.
- Sethi, A. K. (1990). Flexibility in Manufacturing: A Survey. In *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* (Vol. 2). Kluwer Academic Publishers.
- Tüzün, E., & Tekinerdogan, B. (2015). Analyzing impact of experience curve on ROI in the software product line adoption process. *Information and Software Technology*, 59, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2014.09.008>
- Wang, Q., Lassalle, S., Mileham, A. R., & Owen, G. W. (2009a). Analysis of a linear walking worker line using a combination of computer simulation and mathematical modeling approaches. *Journal of Manufacturing Systems*, 28(2–3), 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2009.12.001>
- Wright, T. P. (1936). Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of the Aeronautical Sciences* 3.4 .
- Zennaro, I., Calzavara, M., Faccio, M., & Persona, A. (2023). Consideration of the learning effect in the comparison of Fixed Worker and Walking Worker assembly systems. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 707–712. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1649>