

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI TECNICHE E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

Corso Di Laurea in INGEGNERIA MECCATRONICA

**“MODELLI SIMULATIVI PER LA PROGETTAZIONE DI UNA LINEA
DI ASSEMBLAGGIO CON OPERATORI FISSI O MOBILI”**

Relatore:

Dr. Serena Finco

Laureando:

Brian Casagrande

Numero di matricola:

1220783

Anno Accademico 2021/2022

Indice

SOMMARIO.....	2
1. INTRODUZIONE.....	3
Operatori fissi - Fixed worker	3
Operatori mobili – Walking worker	4
Sviluppo della linea di assemblaggio	5
Introduzione ai modelli simulativi	6
Obiettivo dello studio	6
2. MODELLI SIMULATIVI E ANALISI DEI DATI	7
Tempo di processo	7
Struttura dati ottenuti	8
Analisi matematica dei dati	9
3. MODELLI SVILUPPATI E CONFRONTO DEI RISULTATI	10
Caso studio	10
Modello con operatori fissi.....	12
Modello con operatori mobili.....	15
Risultati delle simulazioni e confronto	16
4. CONCLUSIONI	32
BIBLIOGRAFIA	33

SOMMARIO

I metodi di organizzazione della produzione di una linea di assemblaggio con operatori fissi e con operatori mobili sono i più diffusi nell'ambito industriale. Il primo, quello tradizionale, è molto efficiente perché ogni stazione della linea ha il proprio operatore, il quale deve compiere solo l'operazione destinata a tale postazione. Il secondo, un metodo più recente, tenta di legare all'efficienza dell'operatore fisso anche la flessibilità che ne deriva da avere operatori che possono eseguire più task in diverse stazioni della linea. In questo documento verranno analizzate diverse linee di assemblaggio al variare di parametri caratteristici con operatori fissi o mobili grazie all'utilizzo di modelli simulativi. Successivamente i dati raccolti verranno analizzati per poter determinare quale dei due metodi è il più conveniente in una determinata situazione.

1. INTRODUZIONE

La linea di assemblaggio è una sequenza di stazioni consecutive da cui si ottiene il prodotto finito. Quindi le lavorazioni, per realizzare il prodotto tramite un layout in linea, devono rispettare una determinata sequenza studiata in fase di progettazione. I due metodi analizzati in questo documento, riguardanti la gestione degli operatori, sono: linea ad operatori fissi oppure operatori mobili. Le risorse umane permettono all'azienda di migliorare le caratteristiche della produzione a seconda delle proprie esigenze. Di seguito verranno approfondite le due metodologie, evidenziandone i vantaggi e svantaggi. Successivamente si porrà l'attenzione sul cambiamento del mercato che sta portando il settore industriale, soprattutto quello di produzione di massa, a rivedere la propria organizzazione.

Operatori fissi - Fixed worker

La linea di assemblaggio fino ad ora più utilizzata nel settore industriale è quella che viene definita ad operatori fissi. In questa tipologia l'operatore lavora in una ben definita stazione della linea e compie una serie di attività di assemblaggio. Quando l'operazione è conclusa, il sub-assemblato viene trasferito alla stazione successiva in cui un altro operatore eseguirà i successivi tasks di assemblaggio. Il pezzo giunto all'ultima stazione può essere inviato ad un'altra linea per ulteriori lavorazioni oppure imballato e messo in commercio.

Questo metodo è stato impiegato in modo rilevante in passato ed è ancora molto utilizzato. Infatti, consente di ottenere una buona efficienza in termini di numero di pezzi prodotti in un determinato periodo di tempo, se i volumi sono elevati ma la varietà di prodotti finiti bassa

La *Figura 1* mostra in modo schematico la configurazione di una linea ad operatori fissi (chiamati anche fixed worker, FW).

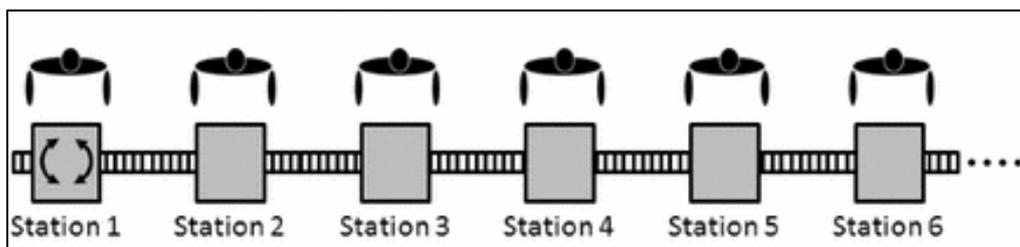


Figura 1 - Operatori fissi

Uno dei principali difetti di questo concetto risiede nella difficoltà di bilanciare la linea. Una linea è definita bilanciata quando i tempi di lavorazione di tutte le stazioni sono più simili possibile. Teoricamente una linea è bilanciata quando gli operatori di ciascuna stazione impiegano lo stesso tempo in ogni ciclo per eseguire i propri task. Gli operatori in questo caso non dovrebbero mai fermarsi, ma nella realtà la risorsa umana ha bisogno di alcune pause durante la giornata o turno di lavoro. Inoltre, gli operatori fissi dedicati alla linea hanno una percentuale di assenteismo elevata e ciò è la causa principale di inefficienza della risorsa. Perciò qualsiasi variazione di tempo in un qualunque punto della catena (i.e. un operatore più lento) può provocare grandi ritardi e disfunzioni nella linea. Il modo più comune per trattare tale problema è l'utilizzo di buffer interoperazionali nella linea di produzione, ove necessario. Questa aggiunta porta ad un aumento del work in progress e dei costi (infrastruttura, spazio, manutenzione, ...). Infine, il fatto che ogni stazione debba avere il proprio operatore, risulta dispendioso quando il volume di produzione è relativamente basso. Da questo ne deriva una riduzione di efficienza (idealmente ogni stazione deve essere sempre in fase di produzione) ed un basso adattamento alla variazione della domanda del mercato, quindi una bassa flessibilità.

Operatori mobili – Walking worker

Il metodo convenzionale appare incapace di soddisfare le caratteristiche riportate nel paragrafo precedente. Questo difetto può portare a ritardi nelle consegne, con conseguente diminuzione della soddisfazione del cliente.

Per tale motivo le aziende si stanno muovendo verso un nuovo approccio dell'organizzazione degli operatori. Questi vengono formati in azienda nelle diverse tipologie di lavorazione e cicli produttivi che vengono utilizzati per la realizzazione dei loro prodotti. Grazie a queste conoscenze il lavoratore è in grado di eseguire più operazioni lungo una linea di assemblaggio. Da questa capacità si sono diffusi principalmente due nuovi metodi. Entrambi prevedono che l'operatore non sia vincolato a lavorare in una specifica stazione, ma che segua il pezzo in più operazioni fino a quando lo consegnerà alla fase successiva.

I due metodi sono:

- U-Shaped design (Figura 3);
- Linear walking worker (Figura 4).

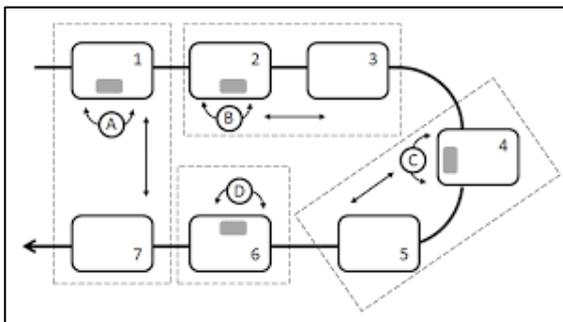


Figura 2 – U-Shaped design

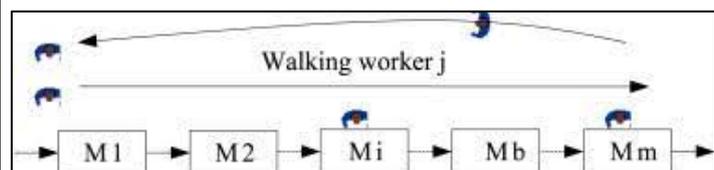


Figura 3 – Linear walking worker

Nelle linee U-Shaped gli operatori, come mostrato in figura 3, operano su più macchinari consecutivi seguendo il pezzo lungo la linea e sono sempre posizionati nella parte interna. Come si può notare l'operatore A ha la possibilità di attraversare lo spazio di lavoro ed arrivare all'altro ramo della linea. L'operatore D invece si trova a lavorare in una stazione dove il tempo necessario al completamento del task è maggiore. Quindi per evitare ritardi, alla stazione 6 viene assegnato un operatore fisso.

Questa configurazione aumenta l'efficienza, la flessibilità e la produttività dei lavoratori, grazie anche alla formazione ricevuta. Inoltre è possibile anche implementare l'utilizzo dei Kanban e della logica *pull*, i quali portano ad una riduzione del work in progress (WIP) nel magazzino, delle variazioni dei tempi ciclo e quindi del tempo di lavorazione. Avendo degli operatori capaci di lavorare in diverse stazioni è facile riconfigurare la linea in base al prodotto e la quantità da produrre. Un altro vantaggio portato da questo metodo è la possibilità di posizionare i macchinari vicini tra loro, così da ridurre il tempo di spostamento, sia del pezzo sia dell'operatore, e migliora la comunicazione e il lavoro di gruppo. Da questa vicinanza delle stazioni però ne deriva un limitato numero di operatori che possono muoversi all'interno dello spazio del lavoro. Di solito il numero di stazioni è molto maggiore rispetto al numero di operatori che risulta in un basso utilizzo dei macchinari e massimo output realizzabile. In aggiunta risulta difficile bilanciare la linea evitando incroci nell'attraversamento degli operatori. Solitamente solo i primi operatori, che si trovano agli estremi dei rami (i.e. operatore A in figura 3), possono attraversare senza incrociare la traiettoria degli altri.

Il secondo metodo invece utilizza una catena di assemblaggio disposta linearmente. In questo documento verrà trattata la tipologia denominata *bucket brigade*, nella quale ogni operatore prende il pezzo da lavorare e passa in ogni stazione, dalla prima all'ultima del relativo ciclo produttivo. A questo punto l'assemblato viene ceduto ad un'altra linea o è pronto ad essere imballato e mandato al cliente. Mentre il lavoratore, una volta raggiunta la fine della linea, torna al punto di partenza e ricomincia nuovamente il ciclo. Questo è possibile vederlo nella figura 4. L'operatore j parte dalla prima stazione M1 e, seguendo il ciclo di lavorazione del pezzo, si ferma ad ogni macchina, esegue i tasks e procede alla successiva. Una volta giunto alla Mm, consegna il pezzo e torna all'inizio per ripetere nuovamente il ciclo.

Un aspetto che si evidenzia da questo metodo è la necessità di formare gli operatori sull'intero ciclo produttivo, con difficoltà legate direttamente alla complessità del prodotto. Tale bisogno è uno dei principali motivi per cui molte aziende non hanno ancora implementato questo nuovo metodo. Necessita di tempo per l'organizzazione del ciclo di lavorazione, per determinare il numero adatto di operatori e la loro successiva istruzione, oltre ovviamente i costi iniziali che comporta.

Oltre a ciò, questo metodo ingloba tutti i benefici della linea U-Shaped e ne aggiunge molti altri. Una volta superate le difficoltà iniziali, il fatto che ogni operatore riesca ad eseguire tutti i tasks può aumentare in maniera significativa l'efficienza media del sistema (i.e. maggiore output, tempo ciclo minore, ...). Questo metodo non ha bisogno di buffer di dimensioni notevoli, soprattutto in una linea con basse variazioni di tempo ciclo dove non sono addirittura richiesti. Un'altra caratteristica di tale strategia è la facile riconfigurazione della linea, sia delle stazioni da utilizzare sia del numero di operatori. Inoltre offre un'ottima tolleranza alle variazioni del tempo di lavorazione, una riduzione del WIP ed è possibile utilizzare i trasportatori, quelli meno complessi, non automatizzati. L'organizzazione in *walking worker* della può essere affetta negativamente del fattore umano degli operatori, come le capacità e dei lavoratori non distribuite in modo omogeneo e differenti velocità di lavoro. Da ciò si può dedurre che un operatore può essere rallentato da un operatore più lento, quindi trovarsi bloccato. Una soluzione può essere quella di far uscire il lavoratore più lento dalla linea e mandarlo a seguire un ulteriore periodo di preparazione. Perciò, se una linea, che implementa tale metodo, è ben bilanciata, l'operatore non si troverà mai in una situazione di *blocking* (non poter procedere) né di *starving* (non aver pezzi da lavorare). La seconda non può accadere in quanto ogni operatore segue il pezzo per tutta la linea, quindi non deve attendere che il materiale arrivi da stazioni precedenti.

Successivamente verranno confrontati i metodi che utilizzano gli operatori fissi e mobili, evidenziando in quali situazioni convengono utilizzando i dati raccolti dai modelli simulativi implementati.

Sviluppo della linea di assemblaggio

I consumatori stanno cambiando.

In passato il cliente ricercava nel mercato di riferimento il prodotto che meglio soddisfaceva i suoi bisogni senza porre attenzione alla varietà e personalizzazione offerta. Il mercato a cui si rivolgeva questa clientela proponeva elevatissime quantità dello stesso prodotto. Mentre ora, anche grazie all'avvenimento di Internet e alla globalizzazione, i consumatori richiedono prodotti o servizi che riescano a soddisfare i desideri peculiari dei singoli. Perciò un'azienda deve operare in modo tale da riuscire a fornire più varianti di prodotto. Un esempio in cui si può vedere tale cambiamento sono le automobili. Inizialmente in commercio c'erano pochi modelli ma in quantità considerevoli invece, oggi, si è arrivati ad avere un'ampia varietà del prodotto ma in quantità più contenute.

Questa evoluzione della domanda porta le aziende a rivedere la propria organizzazione. La variabilità sotto ogni aspetto dei prodotti, impianti e sistemi di supporto riconfigurabili si trova alla base per il futuro della progettazione di nuovi sistemi di produzione. Questi dovranno rispettare le necessità dell'industria, come: poter essere progettati rapidamente, dare la possibilità di veloce riconfigurazione per la produzione di nuovi modelli, adattare la capacità produttiva, integrare nuove tecnologie e produrre una maggiore varietà di prodotti in quantità non prevedibile. Il sistema deve essere legato ad alcune caratteristiche fondamentali tra

cui rapidità, flessibilità, agilità, reattività e riconfigurabilità. Confrontato ai sistemi di assemblaggio convenzionali, i nuovi sistemi dovranno aggiungere alla flessibilità nel produrre una maggior varietà di prodotti anche la flessibilità nel riuscire a modificare il sistema stesso.

Con questo cambiamento si è segnato il passaggio dall'utilizzo dei fixed worker ai walking worker che, come spiegato nel paragrafo precedente, sono più tolleranti alle variazioni della linea di assemblaggio.

Introduzione ai modelli simulativi

Uno strumento molto utilizzato oggi nell'ambito industriale e non solo è quello del simulare i processi. Attraverso le simulazioni l'azienda può fare delle considerazioni sulla fattibilità di un nuovo progetto o su come modificare un impianto già esistente. Nell'ambito di questo documento le simulazioni verranno utilizzate per confrontare quale configurazione è più conveniente tra operatori fissi e mobili, inserendo determinati parametri che verranno illustrati nel capitolo successivo.

Per ottenere dati dalle simulazioni, l'azienda deve prima sviluppare il modello dell'impianto o del processo. Più il modello sarà dettagliato e coerente più i dati saranno veritieri. Molti programmi permettono di valutare anche l'ergonomicità per il lavoratore, ma uno dei principali aspetti che non si riesce a realizzare, in modo accurato nei modelli, è quello di combinare nello studio delle performance di un sistema il fattore umano degli operatori. È dovuto anche al fatto che questi vengono definiti come risorse, a cui è possibile legare dei parametri che però non ne descrivono il comportamento reale.

Obiettivo dello studio

L'obiettivo dello studio è quello di fornire uno strumento alle aziende per definire, nella prima fase di progettazione della linea, quale configurazione utilizzare per le risorse umane in base all'output medio o la percentuale di utilizzo media di queste. Ne deriva la necessità di confrontare la stessa linea organizzata con operatori fissi o mobili al variare di alcuni parametri, come il tempo di esecuzione dei tasks per ogni stazione, il numero di operatori e il tempo di spostamento tra una stazione e l'altra. Consultando questo strumento sarà così possibile per le imprese fare delle prime considerazioni per la realizzazione e l'organizzazione dell'impianto, in base all'output richiesto o all'utilizzo degli operatori voluto.

Nei capitoli successivi verranno descritti in modo più dettagliato l'analisi matematica dei dati ottenuti dalle simulazioni, i parametri caratteristici e i modelli utilizzati nello specifico, realizzati tramite il programma Anylogic. Nell'ultimo capitolo verranno esaminati i risultati delle simulazioni. Nello specifico viene composta una base di partenza per definire quale configurazione sia migliore tra fixed worker e walking worker in base alla domanda richiesta del prodotto o l'utilizzo medio richiesto dall'azienda.

2. MODELLI SIMULATIVI E ANALISI DEI DATI

In questo capitolo viene illustrata l'analisi dei dati ottenuti dalle simulazioni. Tali dati sono affetti da alcune ipotesi che sono elencate di seguito:

- Nei modelli il tempo di trasporto dei buffer tra una stazione e la successiva è sempre uguale per tutta linea. Per il modello degli operatori walking worker tale tempo varierà a seconda della velocità di spostamento della risorsa, restando comunque costante per la durata di una specifica simulazione.
- Per evitare collisioni, un operatore più veloce non può superare uno più lento.
- Le pause, i settaggi delle macchine e il tempo che intercorre tra la fine della lavorazione di un pezzo e l'inizio della lavorazione del successivo non vengono considerati
- Il tempo di lavorazione di ogni stazione segue la stessa distribuzione normale con media e sigma definite per ogni simulazione.
- Non è tenuto in considerazione il fattore umano degli operatori.

L'analisi è la stessa sia per i modelli con fixed worker sia con walking worker con il fine di ricavare l'utilizzo medio degli operatori e l'output medio normalizzato per ogni operatore.

Tempo di processo

Il tempo di lavorazione ad ogni stazione segue una legge di tipo probabilistico. La legge in questo caso è quella della distribuzione normale (o di Gauss): una distribuzione di probabilità che viene utilizzata per descrivere, in modo approssimativo, variabili casuali che si concentrano attorno ad un singolo valore medio.

Questa distribuzione dipende da due parametri, la media μ e la varianza σ^2 , e può essere indicata come

$$N(\mu; \sigma^2)$$

e fa riferimento alla seguente funzione di densità di probabilità:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} * e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

La figura 4 mostra la curva della distribuzione normale, con la relativa percentuale di probabilità di ricadere in un determinato intervallo di valori.

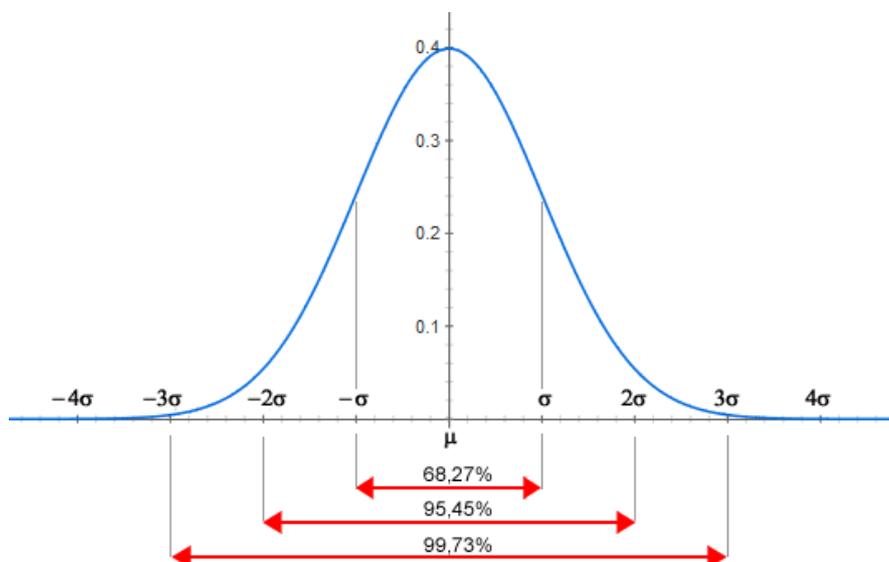


Figura 4 – Curva della distribuzione normale

La forma della curva cambia al variare del valore della deviazione standard (o scarto quadratico medio) σ .

Infatti, la media e la deviazione standard sono due dei dati di input al modello per simulare il comportamento degli operatori.

Struttura dati ottenuti

Per ogni simulazione di ogni configurazione della linea vengono effettuate 2000 replicazioni, tutte diverse tra loro in modo da ottenere una varietà di risultati che riesca a rappresentare la maggior parte delle situazioni possibili. Per ognuna di queste replicazioni vengono salvati, in un file Excel, l'output della linea e l'utilizzo degli operatori. Viene utilizzato un numero alto di iterazioni, non solo per avere una visione di quasi tutti i casi possibili, ma anche per stabilire un valore medio di output ed utilizzo che sia più preciso e veritiero. Nella figura 5 è possibile vedere un esempio dell'andamento del valore medio in relazione al numero di replicazioni.

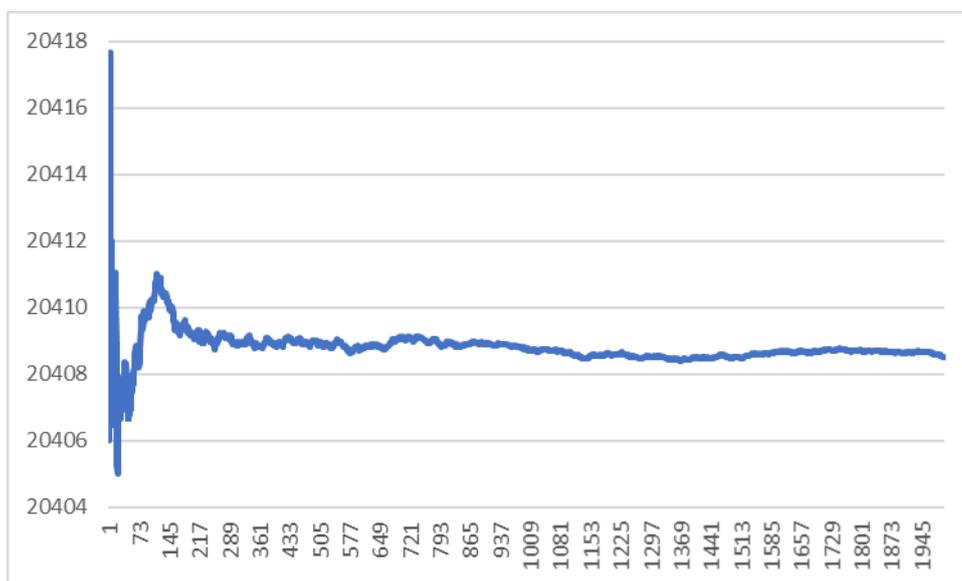


Figura 5 – Esempio di andamento dell'output medio della linea all'aumentare del numero di replicazioni

Come si può notare dalla curva, il valore si stabilizza tra le 800 e 1000 replicazioni. Quindi, per tale simulazione, potrebbero bastare meno replicazioni per ottenere un valore ottimale. Questa possibile riduzione vale per la configurazione della linea attuale e non può essere utilizzata se viene modificato il modello.

Perciò la struttura dei dati ottenuti per ogni simulazione comprende 2000 risultati di output e di utilizzo degli operatori che successivamente andranno analizzati. L'unica differenza è tra la raccolta del dato di utilizzo dei fixed workers e dei walking workers. Per i primi questo dato viene salvato per ogni risorsa legata alla rispettiva stazione, mentre per gli operatori mobili viene salvato l'utilizzo complessivo delle risorse impiegate. Nel paragrafo successivo viene mostrata l'analisi dei dati per entrambe le configurazioni.

Analisi matematica dei dati

Lo studio dei dati è molto semplice. Di seguito verrà spiegato come calcolare l'output medio per ogni operatore e il relativo utilizzo medio. La complessità di tale analisi sta nella quantità di dati da processare, in quanto per ogni lunghezza della linea considerata ci sono un numero considerevole di combinazioni dei vari parametri. Nel capitolo successivo verrà presentato in modo accurato i modelli realizzati ed i relativi parametri.

La notazione utilizzata è la seguente:

- n : numero di stazioni della linea ($n \in [1, 10]$);
- m : numero di operatori ($m \in [1, 10]$);
- N : numero repliche ($N = 2000$);
- Q_i : output della linea ($1 \leq i \leq N$);
- Q_m : output medio della linea;
- Q_{op} : output medio di un operatore;
- u_i : utilizzo operatori della linea;
- $u_{i,j}$: utilizzo dell'operatore j della replicazione i ($1 \leq j \leq m$);
- u_{op} : utilizzo medio di un operatore.

L'output medio per ogni operatore viene calcolato nello stesso modo sia per i modelli dei fixed e walking workers. Consiste in una media aritmetica di tutti i risultati ottenuti ed una divisione per il numero degli operatori:

$$Q_m = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N}$$
$$Q_{op} = \frac{Q_m}{m}$$

Per l'utilizzo invece il procedimento si differenzia tra i due modelli, in quanto i dati ottenuti dalle simulazioni vengono disposti in maniera diversa.

- Fixed worker: in questo caso l'utilizzo degli m lavoratori coincide con l'utilizzo delle n stazioni, perché $m = n$. Viene prima calcolato l'utilizzo medio degli operatori della replicazione i e successivamente l'utilizzo medio definitivo:

$$u_i = \frac{\sum_{j=1}^m u_{i,j}}{m}$$
$$u_{op} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i}{N}$$

- Walking worker: in questo modello l'utilizzo è quello complessivo degli operatori, quindi è necessario solamente calcolare la media di tutte le repliche i .

$$u_{op} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i}{N}$$

Nel capitolo successivo, questi dati verranno confrontati tramite l'utilizzo di grafici e tabelle per determinare quale configurazione risulta conveniente in una determinata situazione.

3. MODELLI SVILUPPATI E CONFRONTO DEI RISULTATI

Caso studio

La situazione analizzata riguarda linee semplificate di lunghezze diverse che utilizzano, in un caso, gli operatori fissi e, nell'altro, gli operatori mobili. Entrambe le configurazioni usano dei parametri del sistema che sono elencati nelle tabelle seguenti.

Le linee che verranno studiate sono formate da 6 a 10 stazioni. Per ognuna di queste linee verranno simulati dei periodi di produzione caratterizzati da numero di operatori, tempi di lavorazione e tempi di trasporto/spostamento o time to travel diversi. Il periodo considerato è equivalente di 22 giorni lavorativi per 8 ore al giorno. In questo intervallo di tempo non sono considerate pause, setup delle macchine, guasti e altri eventi che possono accadere durante la produzione. Di seguito vengono descritti i vari parametri per le due tipologie.

Per i fixed worker il numero di operatori deve coincidere con il numero di stazioni. Anche il time to travel tra le stazioni in tutte le simulazioni resterà sempre lo stesso. Nel modello questo tempo è stato impostato a 2 secondi, perché vengono considerati conveyor lunghi 2 m con una velocità di trasporto pari a 1 m/s . L'unico parametro che varia in questo modello è il tempo di lavorazione alla singola stazione. Questo è definito da due parametri: la media μ e la deviazione standard σ . Nella *tabella 1* vengono mostrati i valori utilizzati.

Tempo medio μ [min, sec]	Tempo deviazione standard σ [min, sec]
05:00	00:00
10:00	00:30
15:00	01:00
20:00	01:30
	02:00
	02:30
	03:00
	04:00
	05:00
	06:00
	07:00
	08:00
	09:00
	10:00
	12:30
	15:00
	17:30
	20:00

Tabella 1 – Valori dei tempi di lavorazione medi e delle deviazioni standard utilizzati nelle simulazioni dei due modelli

Per ogni media viene eseguita una simulazione con ciascuna delle sigma presenti in tabella. Così facendo è possibile ottenere delle curve che rappresenteranno lo sviluppo dell'output e dell'utilizzo delle risorse al all'aumentare delle variazioni della linea.

Anche per i walking worker vengono utilizzati i tempi di lavorazione della tabella 1. A differenza però degli operatori fissi, anche il numero di operatori e il time to travel vengono fatti variare. Il primo viene fatto variare da 1 al numero stesso delle stazioni della linea considerata, mentre il secondo assume i valori riportati in tabella 2.

Travel Time [sec]
0
2,5
5
10
20
30
60
90
120
150

Tabella 2 – Valori utilizzati per il tempo di trasporto dei walking worker

Quest'ultimo è il tempo che l'operatore impiega per andare da una stazione alla successiva. In questo caso, per semplificare il modello, il tempo di spostamento viene mantenuto uguale tra tutte le stazioni. Come per i fixed worker verranno ricavate delle curve per rappresentare l'andamento dell'output e dell'utilizzo degli operatori.

Considerando i due modelli si ottengono complessivamente, per ogni lunghezza di linea considerata, 72 configurazioni per gli operatori fissi mentre per gli operatori mobili variano a seconda della lunghezza della linea. Contando tutte le linee studiate con i due metodi si ottengono ben 29.520 configurazioni diverse. Questo strumento, per le aziende, può rappresentare il primo passo per la realizzazione di una nuova linea o riconfigurazione di una già esistente. Andando a studiare i grafici e tabelle, descritti nei paragrafi successivi, è possibile determinare quale organizzazione delle risorse è più adatta ad una certa domanda del cliente o ad alcune specifiche richieste dall'azienda stessa.

La tabella 3 e 4 mostrano un esempio dei dati scritti nel file Excel alla fine delle simulazioni. Vengono riportati solo le prime repliche delle duemila effettuate.

N° replica	Output linea	Utilizzo operatore 1	Utilizzo operatore 2	Utilizzo operatore 3	Utilizzo operatore 4	Utilizzo operatore 5	Utilizzo operatore 6	Utilizzo operatore 7	Utilizzo operatore 8	Utilizzo operatore 9	Utilizzo operatore 10
1	934	0,910811	0,883336	0,895204	0,89813	0,885348	0,914263	0,910735	0,861879	0,894442	0,893725
2	937	0,886086	0,901588	0,904117	0,909439	0,872088	0,896392	0,913289	0,899285	0,884599	0,899989

3	933	0,897937	0,899638	0,895203	0,903224	0,910231	0,902438	0,898563	0,879382	0,884012	0,869601
4	925	0,905095	0,885641	0,889561	0,883838	0,869852	0,898699	0,89274	0,87797	0,890686	0,906427
5	938	0,91306	0,900804	0,896231	0,886671	0,886444	0,891726	0,898595	0,893889	0,885928	0,913782
6	940	0,906461	0,912132	0,902222	0,899797	0,889574	0,921261	0,898282	0,890634	0,913551	0,885361
7	942	0,887181	0,910166	0,894954	0,893112	0,898583	0,890884	0,911782	0,886184	0,913571	0,90978
8	935	0,892597	0,918098	0,881203	0,88698	0,872494	0,908872	0,904773	0,907071	0,910749	0,874472
9	930	0,911581	0,910859	0,889675	0,901601	0,887195	0,900693	0,897587	0,889857	0,889864	0,893652
10	932	0,895127	0,910294	0,900899	0,884394	0,904573	0,890591	0,888712	0,920429	0,897886	0,877914

Tabella 3 – Esempio dati relativi ad una linea di 10 stazioni con operatori fissi ($\sigma \neq 0$, $\mu = 5$)

N° replica	Output linea	Utilizzo complessivo degli operatori
1	204	0,999996843
2	207	0,999993687
3	204	0,999996843
4	204	0,999993687
5	203	0,999993687
6	200	0,999996843
7	201	0,999996843
8	203	0,999995265
9	207	0,999996843
10	204	0,999993687

Tabella 4 – Esempio dati relativi ad una linea di 10 stazioni con un unico operatore mobile ($\sigma \neq 0$, Time to travel = 0, $\mu = 5$)

Nei paragrafi successivi saranno descritti nel dettaglio i modelli utilizzati e l'analisi dei dati, come quelli riportati nelle tabelle 3 e 4.

Modello con operatori fissi

I modelli sono stati realizzati utilizzando il programma Anylogic. Nello specifico verranno riportati i modelli relativi alle linee con 10 stazioni e descritte le principali caratteristiche dei blocchi e dei parametri presenti. Inoltre, saranno presentate anche le specifiche delle simulazioni, che resteranno pressoché invariate tra i due modelli.

In figura 6 viene riportata la struttura del modello e i parametri variabili con operatori fissi. Di seguito vengono analizzati i vari blocchi e strutture:

- Source: è il blocco che permette la generazione del pezzo da lavorare. È possibile impostare diversi metodi per gestire il tempo di erogazione (rate, arrival table in Database, ...). Nei modelli implementati viene utilizzato il metodo denominato “interarrival time” che permette di definire il tempo che intercorre tra la creazione di un pezzo e il successivo. Tale parametro è impostato uguale al tempo medio di lavorazione degli operatori alle stazioni. Così facendo il blocco non viene affetto dalle variazioni di tempo date da *sigma* e permette di analizzare solamente gli effetti prodotti dalle variazioni di tempo dei singoli operatori sul output e sull’utilizzo degli stessi.
- Buffer: il blocco utilizzato è chiamato conveyor e permette di simulare diverse tipologie di trasporto del materiale. Inoltre, come dice il nome, funge da buffer tra le stazioni accumulando pezzi nel caso ci siano rallentamenti da parte di alcuni operatori. La capacità di questi strumenti è impostata come infinita, in quanto, come il blocco source, non devono creare ulteriori ritardi o inefficienze. Ad esempio se un operatore è più veloce del successivo, nella realtà, verrebbe rallentato, in quanto il buffer ha dimensioni limitate, e di conseguenza diminuito il suo utilizzo. Invece, con questa configurazione teorica viene evitato tale problema e così resa possibile solo l’osservazione degli effetti delle variazioni dei tempi di lavoro.
- Start – End: questi due blocchi permettono di delimitare un’area della linea di assemblaggio. La principale funzione che permettono di eseguire è quella di limitare il numero di pezzi all’interno dell’area considerata. Nel caso dei modelli presi in esame tale area coincide con la zona di lavoro delle stazioni della linea. Il numero di pezzi consentito all’interno dell’area è uno. Quindi se la stazione è occupata da un operatore, il successivo aspetta che si liberi nel buffer che precede il blocco di Start.
- Seize – Release: il primo ha il compito di richiamare una risorsa per eseguire l’operazione nella stazione legata a questo blocco, mentre il secondo ha il compito, finita l’operazione di assemblaggio di rilasciare la risorsa e renderla disponibile per una nuova operazione. A differenza dei blocchi descritti in precedenza che eseguono la loro funzione nello stesso modo in entrambi i modelli, questi invece differiscono tra loro. Con il blocco release è possibile anche dire cosa un operatore deve fare quando ha terminato l’operazione. Inoltre, per l’analisi matematica, si può impostare se considerare, dopo il rilascio dalla stazione, la risorsa come libera o ancora impegnata. Tale funzione viene utilizzata nel modello con walking worker. Nel modello degli operatori fissi ogni risorsa è legata ad una determinata stazione, perciò come si può vedere dalla figura 6 sono presenti tante coppie seize-release quanto il numero di stazioni della linea. Nel paragrafo successivo verranno descritti per il modello ad operatori mobili.
- Resource: è il blocco che permette di definire il numero di risorse che andranno ad operare nella linea. Come per il seize-release anche per il blocco resource, nel modello con fixed worker, ne verrà associato uno ad ogni stazione con una quantità di risorse pari a 1. È anche possibile definire se la risorsa è statica (fixed) o dinamica (walking) e se questa è soggetta a eventi di blocco (downtime blocks). Nello specifico dei modelli sviluppati non sono considerati eventi di blocco che vadano a interferire con la durata dell’operazione. Quindi, come detto in precedenza, l’unica variabile che interviene nel modello degli operatori fissi sono il tempo medio di lavorazione e la *sigma*.
- Delay: simula il tempo di lavorazione degli operatori nella stazione. Tale tempo è impostato secondo la legge descritta nel Capitolo 2 e vengono utilizzati i parametri in tabella 1. Nei modelli il tempo medio è uguale per ogni stazione. Questo permette di simulare sia linee ben bilanciate (tempi simili, $\sigma \approx 0$) sia linee soggette a grandi variazioni (tempi diversi, $\sigma \geq \mu$).

- Queue: questo blocco rappresenta una coda all'interno dell'area di lavoro della stazione. Con questa funzione permette di accumulare più pezzi prima di mandarli al buffer che segue la stazione. In questo modo è possibile ridurre la probabilità di blocco di una stazione. Ad esempio, prendendo il buffer 2 della figura 6, se in un determinato momento raggiunge la quantità massima di pezzi che può contenere e non ci fosse presente il blocco queue 1, l'operatore dovrebbe fermare la produzione perché non ha la possibilità di far uscire il pezzo dalla stazione. Tale evento si verifica anche per una progettazione non adeguata buffer. Con la coda presente invece l'operatore può continuare a lavorare anche con il buffer pieno e così ridurre la probabilità di blocco della produzione. Nei modelli la capacità impostata per questo blocco è pari a 1, in quanto i buffer hanno capacità infinita e quindi non c'è il rischio che questo risulti pieno.

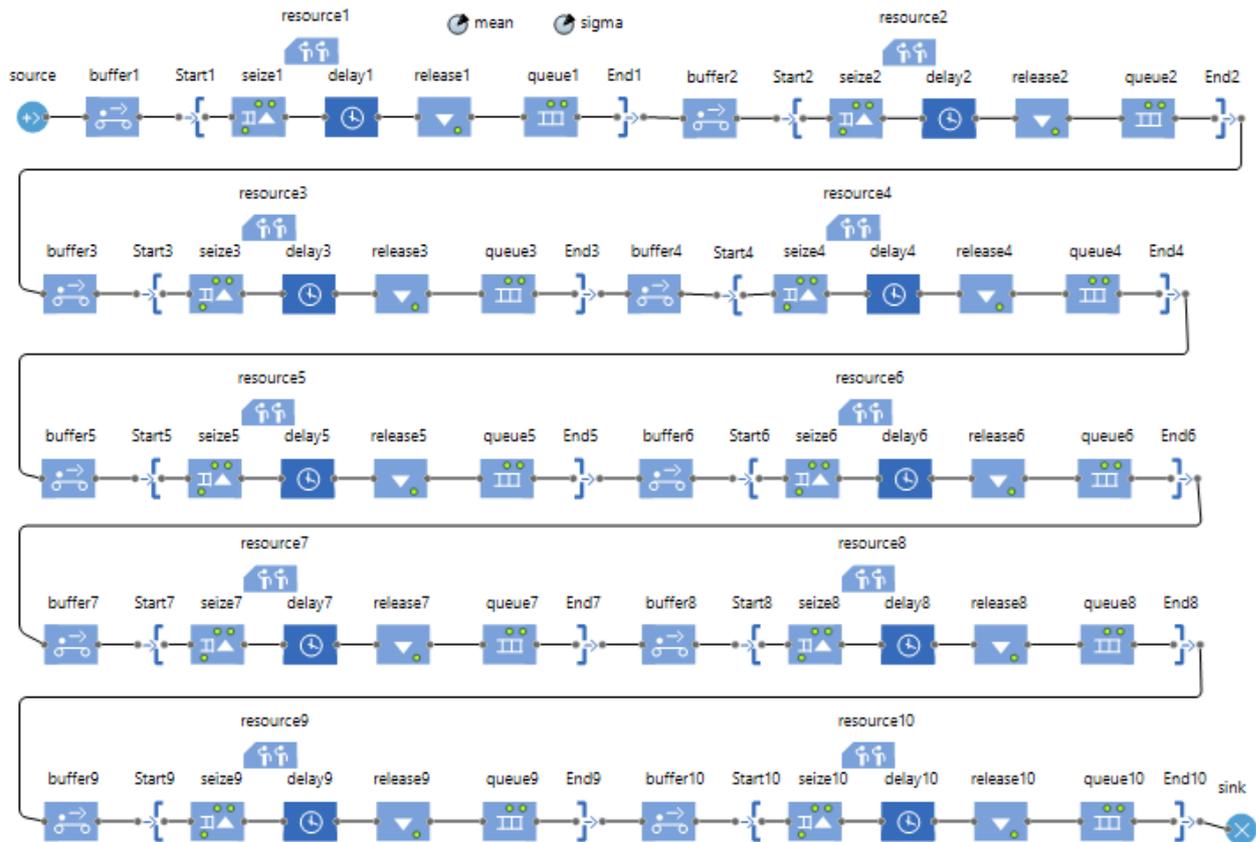


Figura 6 – Modello Anylogic con operatori fissi.

Le impostazioni più importanti per le simulazioni sono mostrate in figura 7.

▼ Randomness

Random number generation:

Random seed (unique simulation runs)

Fixed seed (reproducible simulation runs) Seed value:

Custom generator (subclass of Random):

▼ Replications

Use replications

Fixed number of replications

Replications per iteration:

Figura 7 – Impostazioni simulazioni

Il riquadro Randomness permette di impostare la casualità delle simulazioni. Nel caso dei modelli viene utilizzato il random seed, ovvero ogni simulazione generata è unica e non riproducibile all'interno dell'insieme delle simulazioni di una configurazione della linea. Tale insieme o numero di simulazioni viene definito nel riquadro Replications e, come si può vedere in figura, per ogni iterazione o configurazione vengono eseguite 2000 replicazioni tutte uniche tra loro.

Per compilare i file excel viene utilizzata la seguente funzione in linguaggio Java nel riquadro di riferimento:

```
excelFile.setCellValue("xxxxxx", numero_foglio, numero_riga, numero_colonna); .
```

Per richiedere l'output della linea, nel primo spazio della funzione sopra riportata, viene inserita la sintassi:

```
excelFile.setCellValue(root.sink.count(), numero_foglio, numero_riga, numero_colonna);.
```

Invece per l'utilizzo degli operatori:

```
excelFile.setCellValue(root.resource1.utilization(), numero_foglio, numero_riga, numero_colonna);.
```

Modello con operatori mobili

In figura 8 viene riportato il modello con walking worker e relativi parametri variabili. Di seguito vengono descritti le principali strutture e funzioni che cambiano rispetto al modello con fixed worker. Infatti i blocchi source, buffer, Start-End, queue e delay sono definiti nello stesso modo. I blocchi che cambiano sono Seize-Release e resource:

- Seize – Release: per definizione i walking worker prendono il pezzo all'inizio della linea e lo portano fino alla fine, fermandosi ad ogni stazione necessaria al ciclo operativo. Per questo, a differenza degli operatori fissi, la risorsa verrà richiamata dal blocco seize alla prima stazione e verrà rilasciata dal blocco release quando termina l'operazione all'ultima stazione. Una volta separata dal pezzo la risorsa ripercorre la linea per tornare in posizione all'inizio della linea. Durante questo spostamento, per l'analisi matematica dei risultati, la risorsa viene considerata occupata.
- Resource: in questo modello viene utilizzato un unico blocco resource con impostata la quantità di operatori pari alla variabile *operator* presente in alto nella figura 8. Questo perché l'operatore non è vincolato ad un'unica stazione e deve percorrere l'intera linea. Proprio per questo motivo viene impostata anche la velocità di spostamento secondo la formula $v = 12 / TimeToTravel$ dove 12 è la distanza tra una stazione e l'altra espressa in metri, mentre il *TimeToTravel* è una delle variabili che devono essere impostate.

Per quanto riguarda le impostazioni delle simulazioni non ci sono differenze con il modello ad operatori fissi, se non di sintassi in quanto per i fixed worker vengono richiesti gli utilizzi di ogni risorsa, mentre per i walking worker quello complessivo. Per fare ciò vengono utilizzate comunque le stesse funzioni.

Per questo modello viene effettuato un numero di simulazioni molto maggiore in quanto per ogni linea viene considerato, oltre ai tempi medi e le deviazioni standard del tempo di lavorazione della stazione, anche il numero di operatori (da 1 a 10) e il tempo di spostamento. Tenendo conto anche di queste variabili è possibile ottenere più configurazioni della linea e di conseguenza l'azienda, che vuole utilizzare questo strumento, può avere una prima approssimazione della struttura dell'organizzazione della linea a seconda dei parametri richiesti. Ad esempio a seconda del numero di stazioni e della stabilità del tempo di lavorazione del processo

da realizzare, l'azienda può scegliere quali tra operatori fissi o mobili soddisfano meglio le richieste, come quelle considerate in questo documento di output e utilizzo degli operatori.

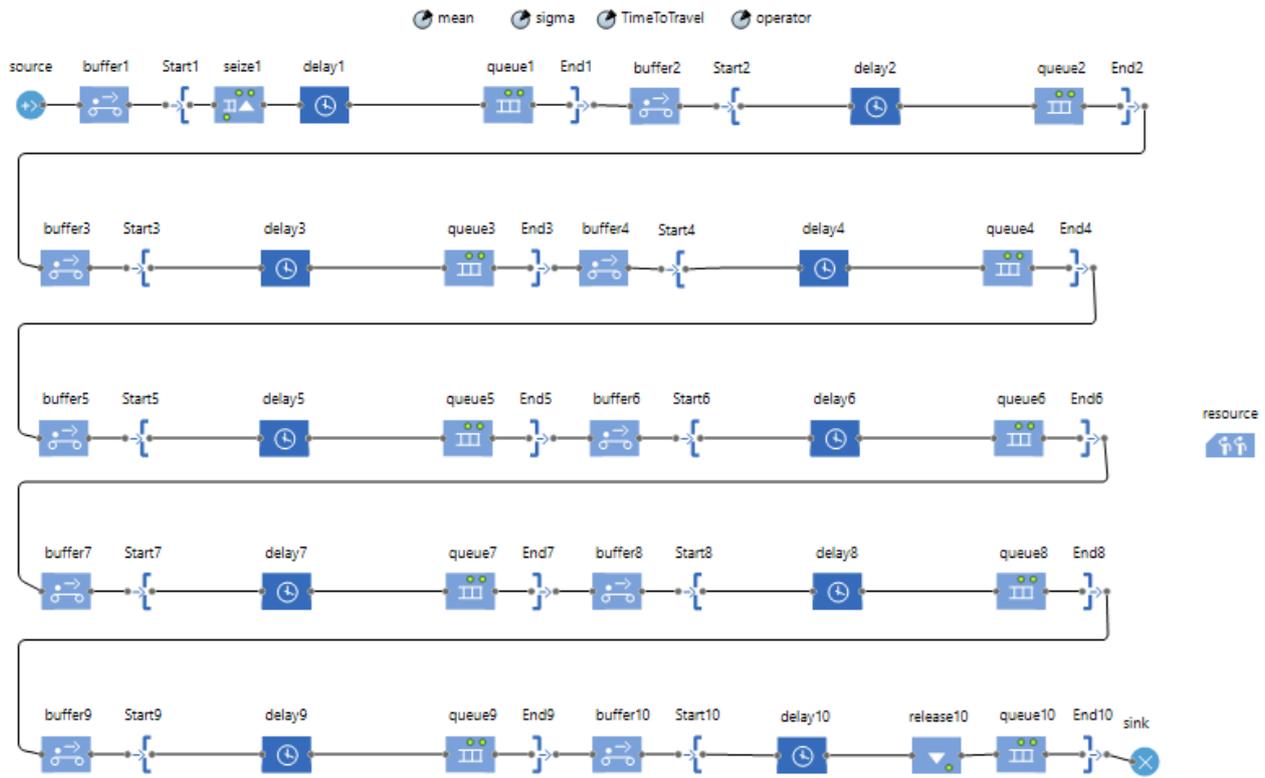


Figura 8 – Modello Anylogic con operatori mobili

Risultati delle simulazioni e confronto

Per semplicità e chiarezza sono stati presi dei campioni che rispecchiano l'andamento dei risultati delle simulazioni. In questo paragrafo verranno utilizzati i risultati dei modelli delle linee con i seguenti parametri:

- Tempo medio di lavorazione: 5 minuti;
- Deviazione standard: si sono presi tre valori per avere una bassa, una media e una alta variazione del tempo ciclo. Per questo sono stati considerati 0,5 minuti (bassa), 2,5 minuti (media) e 5 minuti (alta) per simulare la varianza.
- Tempo di spostamento (operatori mobili): come per la sigma si sono considerati tre valori che sono 2,5 secondi (veloce), 60 secondi (normale) e 150 secondi (lento).

In totale sono 3 simulazioni per i fixed worker, in quanto l'unico parametro che varia è sigma. Mentre sono 90 simulazioni per i walking worker, perché oltre a sigma e al time to travel della risorsa c'è anche il numero di operatori, che varia da 1 a 10.

Di seguito vengono riportati con tabelle e relativi grafici i risultati delle simulazioni sopra indicate.

Successivamente verranno analizzati i due metodi singolarmente e nel paragrafo seguente verranno confrontati al fine di trovare quale configurazione conviene in determinate condizioni.

Per gli operatori fissi:

Tempo medio di lavorazione μ [minuti]	Deviazione standard σ [minuti]	Numero operatori [Op]	Output per operatore [pz/Op]	Utilizzo medio degli operatori
5	0,5	10	207,5658	0,989268
5	2,5	10	180,3557	0,863738
5	5	10	143,7167	0,743

Tabella 5 – Risultati delle simulazioni con 10 operatori fissi

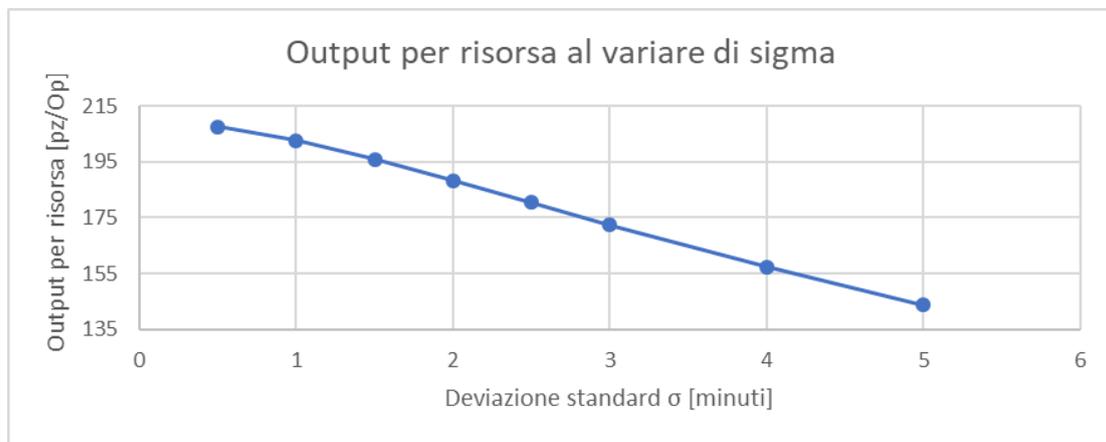


Figura 9 – Andamento dell'output medio per risorsa in funzione di sigma

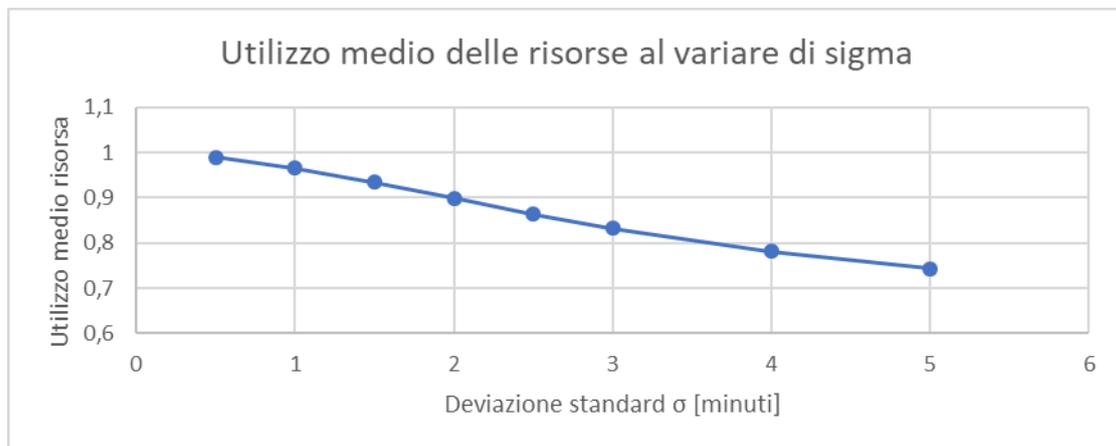


Figura 10 - Andamento dell'utilizzo medio in funzione di sigma

Per gli operatori mobili:

- $\sigma = 0,5$, tempo di spostamento = 2,5 s

Deviazione standard σ [minuti]	Tempo di spostamento [s]	Numero operatori [Op]	Tempo medio di lavorazione μ [minuti]	Output per operatore [pz/Op]	Utilizzo medio degli operatori
0,5	2,5	1	5	207,613	1
0,5	2,5	2	5	207,2333	0,999613
0,5	2,5	3	5	206,8337	0,999226
0,5	2,5	4	5	206,4036	0,998806
0,5	2,5	5	5	205,8451	0,998341
0,5	2,5	6	5	205,0863	0,997777
0,5	2,5	7	5	204,0129	0,997061
0,5	2,5	8	5	202,3128	0,996034
0,5	2,5	9	5	199,2103	0,994279
0,5	2,5	10	5	192,8504	0,990654

Tabella 6 – Risultati simulazioni walking worker $\sigma = 0,5$, tempo di spostamento = 2,5 s

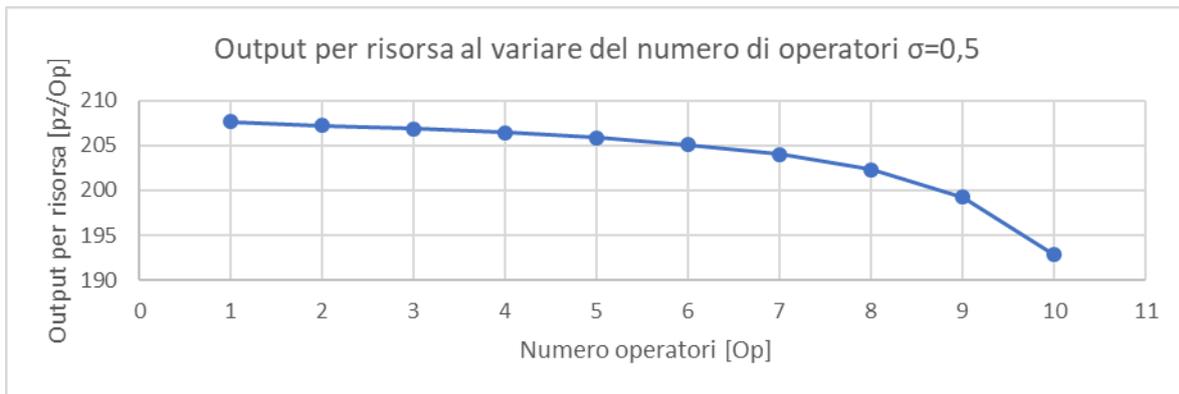


Figura 11 - Andamento dell'output medio per walking worker con $\sigma = 0,5$, tempo di spostamento = 2,5 s

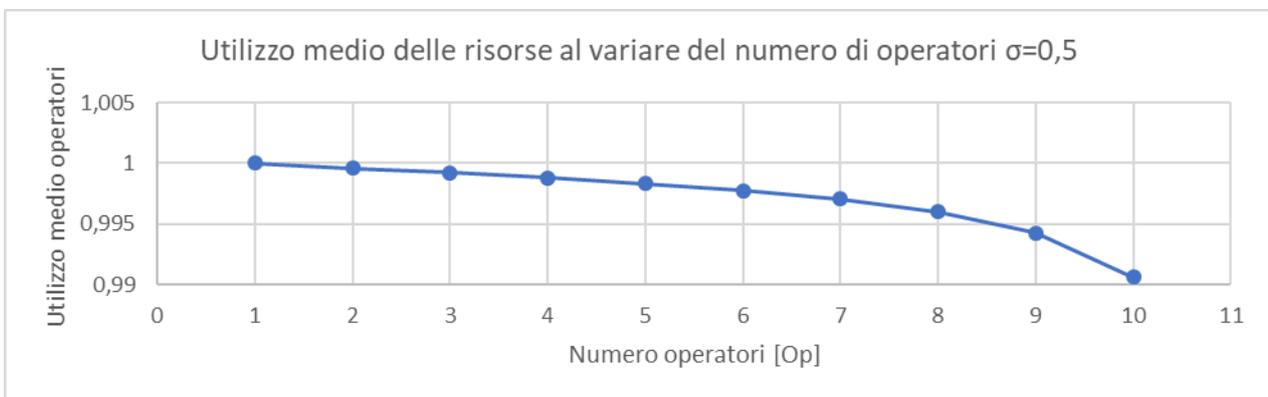


Figura 12 - Andamento dell'utilizzo medio dei walking worker con $\sigma = 0,5$, tempo di spostamento = 2,5 s

- $\sigma = 2,5$, tempo di spostamento = 2,5 s

Deviazione standard σ [minuti]	Tempo di spostamento [s]	Numero operatori [Op]	Tempo medio di lavorazione μ [minuti]	Output per operatore [pz/Op]	Utilizzo medio degli operatori
2,5	2,5	1	5	206,733	1
2,5	2,5	2	5	201,4133	0,997211
2,5	2,5	3	5	195,7595	0,994304
2,5	2,5	4	5	189,9309	0,991297
2,5	2,5	5	5	183,7491	0,988052
2,5	2,5	6	5	177,2666	0,98472
2,5	2,5	7	5	170,4504	0,981148
2,5	2,5	8	5	163,2236	0,977432
2,5	2,5	9	5	155,7817	0,973445
2,5	2,5	10	5	148,3512	0,969571

Tabella 7 – Risultati simulazioni walking worker $\sigma = 2,5$, tempo di spostamento = 2,5 s

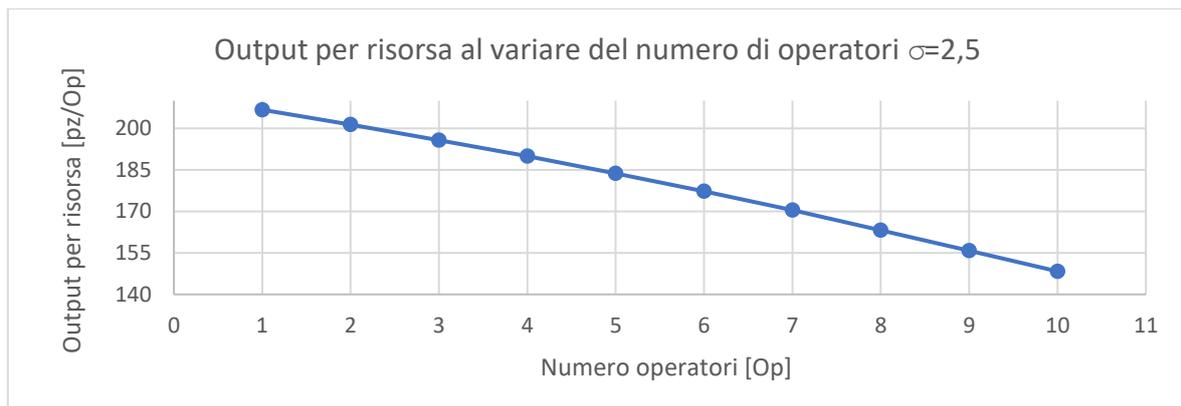


Figura 13 - Andamento dell'output medio per walking worker con $\sigma = 2,5$, tempo di spostamento = 2,5 s

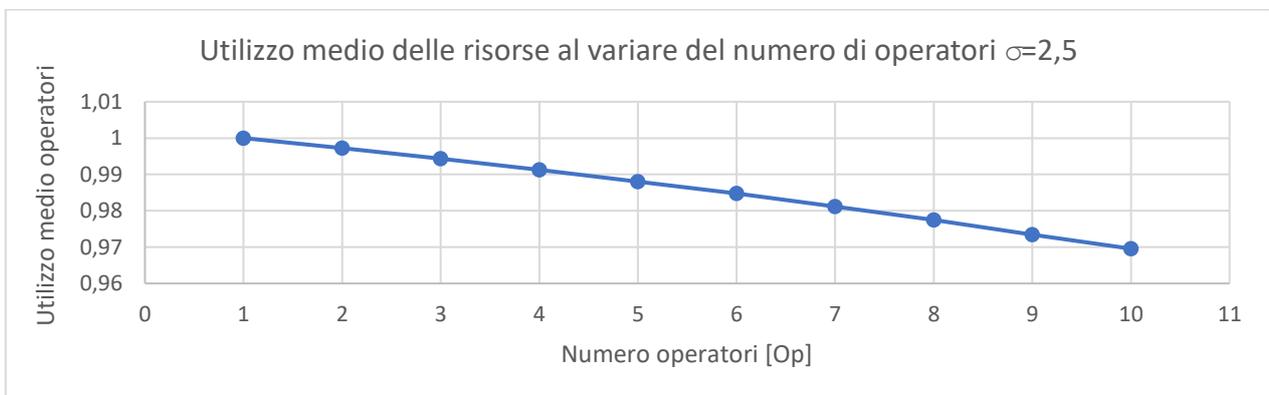


Figura 14 - Andamento dell'utilizzo medio dei walking worker con $\sigma = 2,5$, tempo di spostamento = 2,5 s

- $\sigma = 5$, tempo di spostamento = 2,5 s

Deviazione standard σ [minuti]	Tempo di spostamento [s]	Numero operatori [Op]	Tempo medio di lavorazione μ [minuti]	Output per operatore [pz/Op]	Utilizzo medio degli operatori
5	2,5	1	5	191,8815	1
5	2,5	2	5	179,6023	0,993458
5	2,5	3	5	168,9522	0,987646
5	2,5	4	5	159,2844	0,982345
5	2,5	5	5	150,3054	0,977445
5	2,5	6	5	142,0679	0,972794
5	2,5	7	5	134,3886	0,968622
5	2,5	8	5	127,2389	0,964592
5	2,5	9	5	120,6586	0,96071
5	2,5	10	5	114,5277	0,957254

Tabella 8 - Risultati simulazioni walking worker $\sigma = 5$, tempo di spostamento = 2,5 s

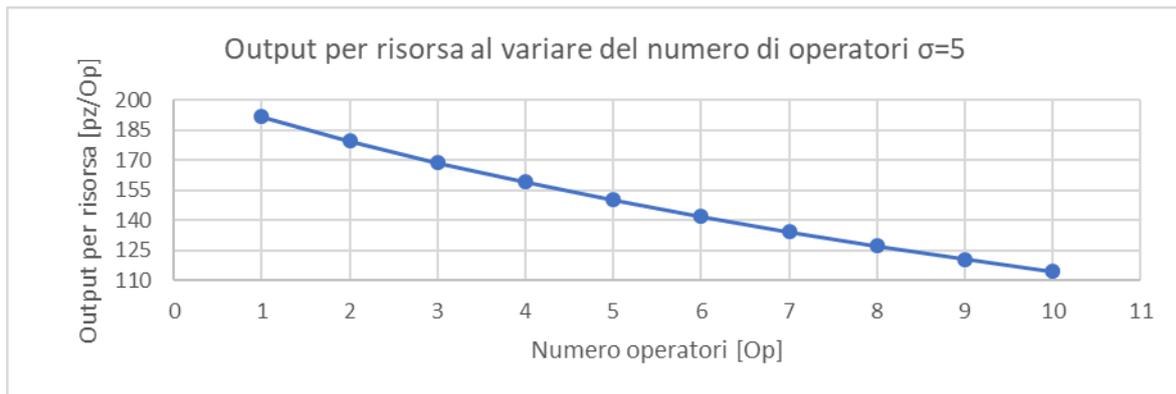


Figura 15 - Andamento dell'output medio per walking worker con $\sigma = 5$, tempo di spostamento = 2,5 s

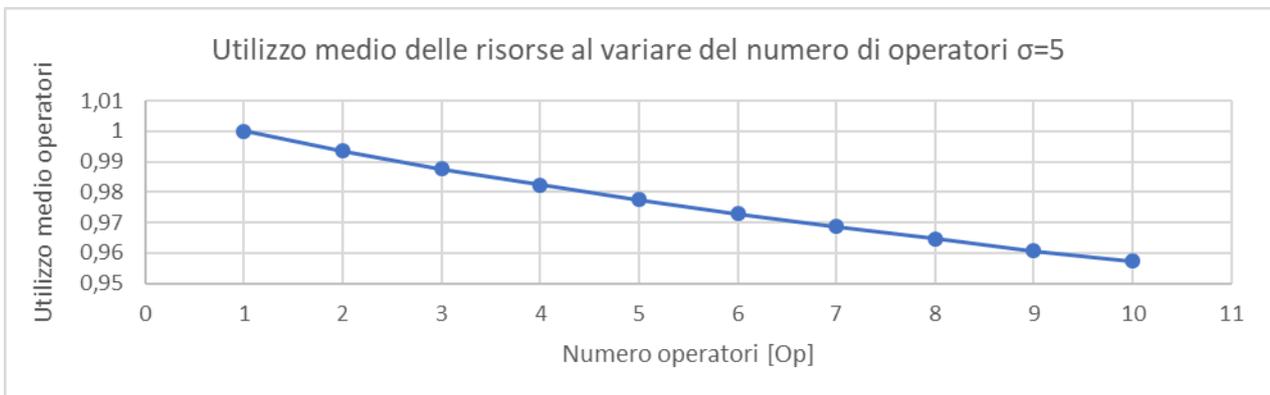


Figura 16 - Andamento dell'utilizzo medio dei walking worker con $\sigma = 5$, tempo di spostamento = 2,5 s

- $\sigma = 0,5$, tempo di spostamento = 60 s

Deviazione standard σ [minuti]	Tempo di spostamento [s]	Numero operatori [Op]	Tempo medio di lavorazione μ [minuti]	Output per operatore [pz/Op]	Utilizzo medio degli operatori
0,5	60	1	5	154,9515	0,999997
0,5	60	2	5	154,737	0,999706
0,5	60	3	5	154,514	0,999379
0,5	60	4	5	154,3264	0,998962
0,5	60	5	5	154,0911	0,998348
0,5	60	6	5	153,7133	0,997029
0,5	60	7	5	152,6658	0,992586
0,5	60	8	5	150,2624	0,982389
0,5	60	9	5	147,3403	0,970617
0,5	60	10	5	144,9086	0,961538

Tabella 9 - Risultati simulazioni walking worker $\sigma = 0,5$, tempo di spostamento = 60 s

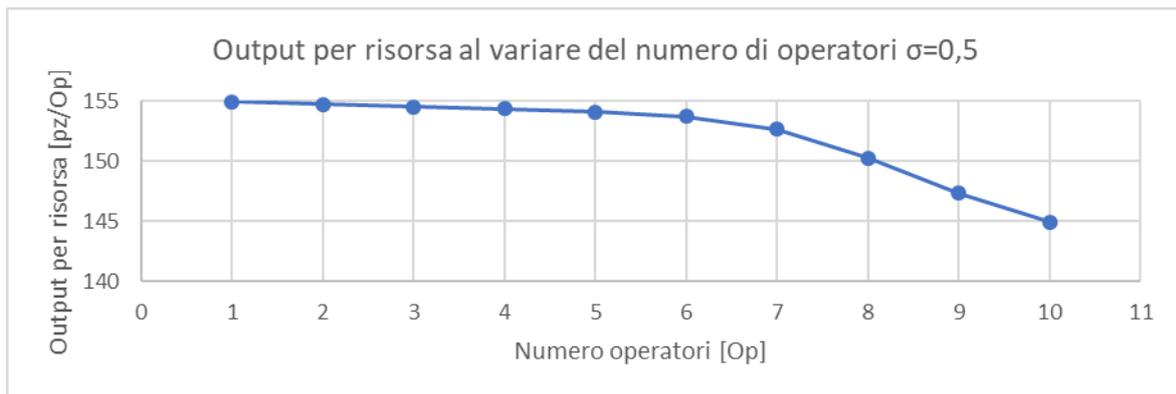


Figura 17 - Andamento dell'output medio per walking worker con $\sigma = 0,5$, tempo di spostamento = 60 s

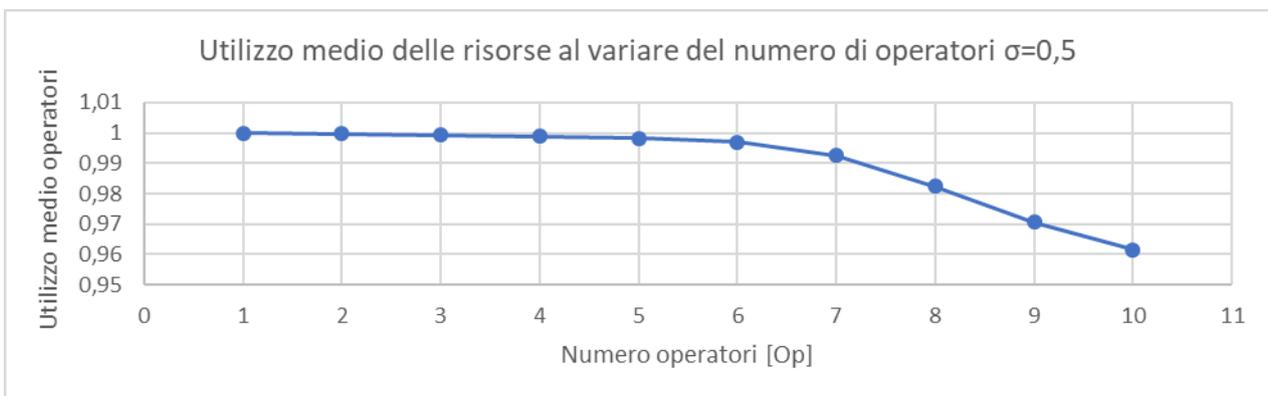


Figura 18 - Andamento dell'utilizzo medio dei walking worker con $\sigma = 0,5$, tempo di spostamento = 60 s

- $\sigma = 2,5$, tempo di spostamento = 60 s

Deviazione standard σ [minuti]	Tempo di spostamento [s]	Numero operatori [Op]	Tempo medio di lavorazione μ [minuti]	Output per operatore [pz/Op]	Utilizzo medio degli operatori
2,5	60	1	5	154,4125	0,999997
2,5	60	2	5	152,1553	0,998766
2,5	60	3	5	149,7748	0,997069
2,5	60	4	5	147,2625	0,994765
2,5	60	5	5	144,5397	0,991936
2,5	60	6	5	141,5493	0,988466
2,5	60	7	5	138,3199	0,984344
2,5	60	8	5	134,7618	0,979515
2,5	60	9	5	130,9682	0,974128
2,5	60	10	5	126,919	0,968129

Tabella 10 - Risultati simulazioni walking worker $\sigma = 2,5$, tempo di spostamento = 60 s

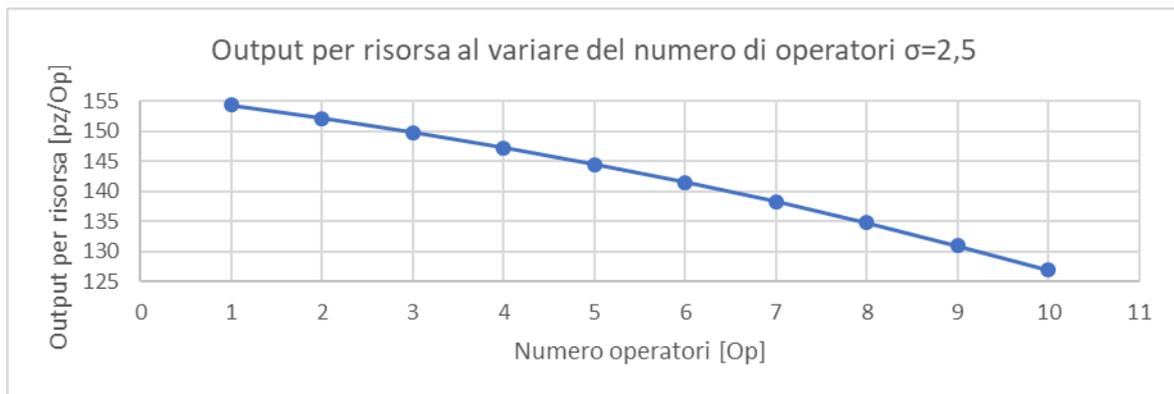


Figura 19 - Andamento dell'output medio per walking worker con $\sigma = 2,5$, tempo di spostamento = 60 s

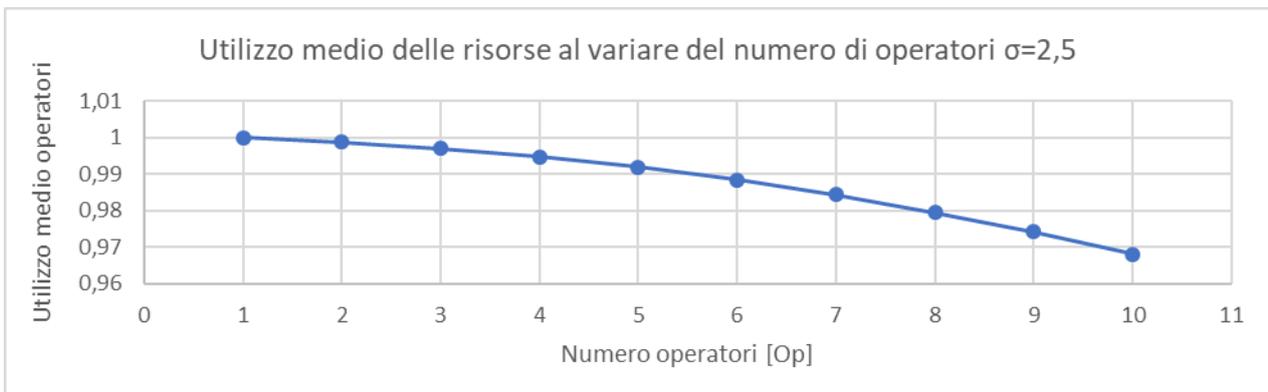


Figura 20 - Andamento dell'utilizzo medio dei walking worker con $\sigma = 2,5$, tempo di spostamento = 60 s

- $\sigma = 5$, tempo di spostamento = 60 s

Deviazione standard σ [minuti]	Tempo di spostamento [s]	Numero operatori [Op]	Tempo medio di lavorazione μ [minuti]	Output per operatore [pz/Op]	Utilizzo medio degli operatori
5	60	1	5	145,9285	0,999997
5	60	2	5	140,4043	0,996826
5	60	3	5	135,1662	0,993059
5	60	4	5	130,0204	0,988777
5	60	5	5	125,0727	0,984304
5	60	6	5	120,2513	0,979493
5	60	7	5	115,5581	0,974778
5	60	8	5	110,9773	0,969643
5	60	9	5	106,6015	0,964636
5	60	10	5	102,4366	0,959572

Tabella 11 - Risultati simulazioni walking worker $\sigma = 5$, tempo di spostamento = 60 s

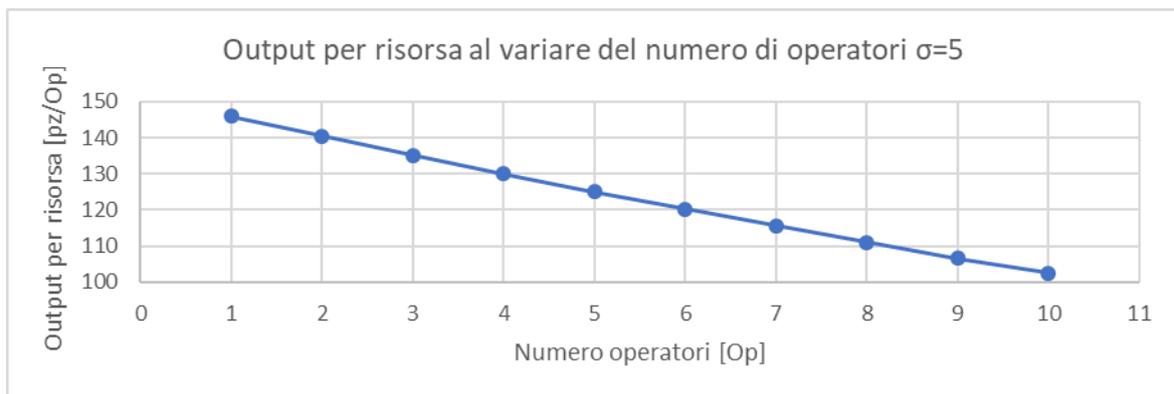


Figura 21 - Andamento dell'output medio per walking worker con $\sigma = 5$, tempo di spostamento = 60 s

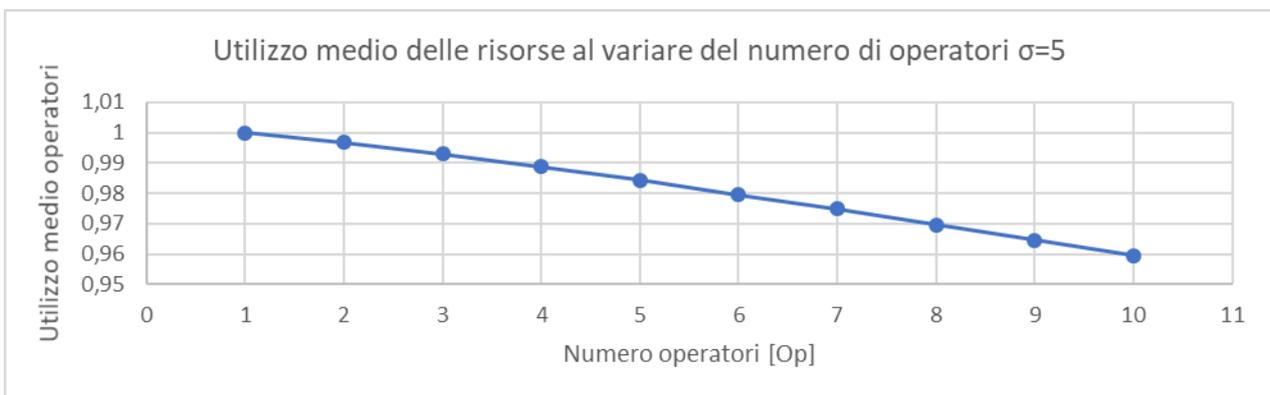


Figura 22 - Andamento dell'utilizzo medio dei walking worker con $\sigma = 5$, tempo di spostamento = 60 s

- $\sigma = 0,5$, tempo di spostamento = 150 s

Deviazione standard σ [minuti]	Tempo di spostamento [s]	Numero operatori [Op]	Tempo medio di lavorazione μ [minuti]	Output per operatore [pz/Op]	Utilizzo medio degli operatori
0,5	150	1	5	110,985	0,999997
0,5	150	2	5	110,6075	0,999642
0,5	150	3	5	110,2028	0,999277
0,5	150	4	5	108,5325	0,998887
0,5	150	5	5	107,1089	0,990933
0,5	150	6	5	104,6479	0,973206
0,5	150	7	5	101,448	0,948497
0,5	150	8	5	99,2885	0,931978
0,5	150	9	5	97,93161	0,921926
0,5	150	10	5	96,8265	0,913635

Tabella 12 - Risultati simulazioni walking worker $\sigma = 0,5$, tempo di spostamento = 150 s

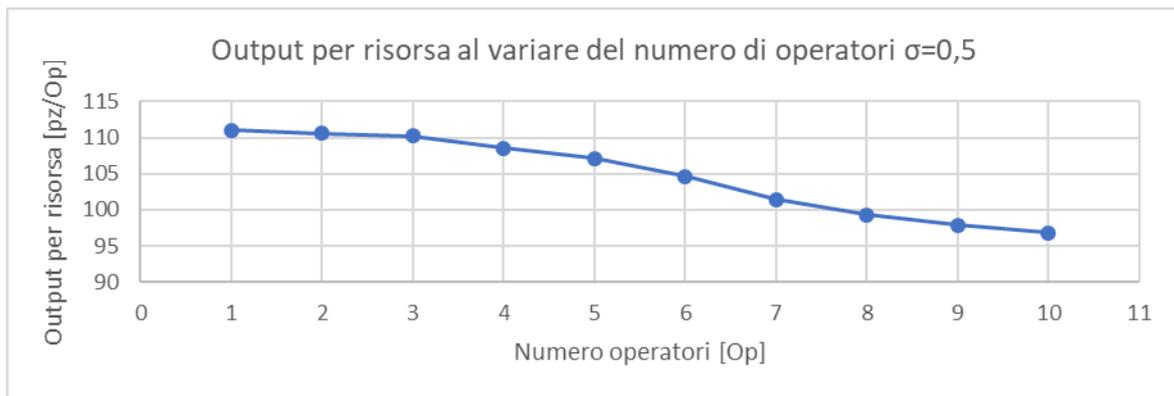


Figura 23 - Andamento dell'output medio per walking worker con $\sigma = 0,5$, tempo di spostamento = 150 s

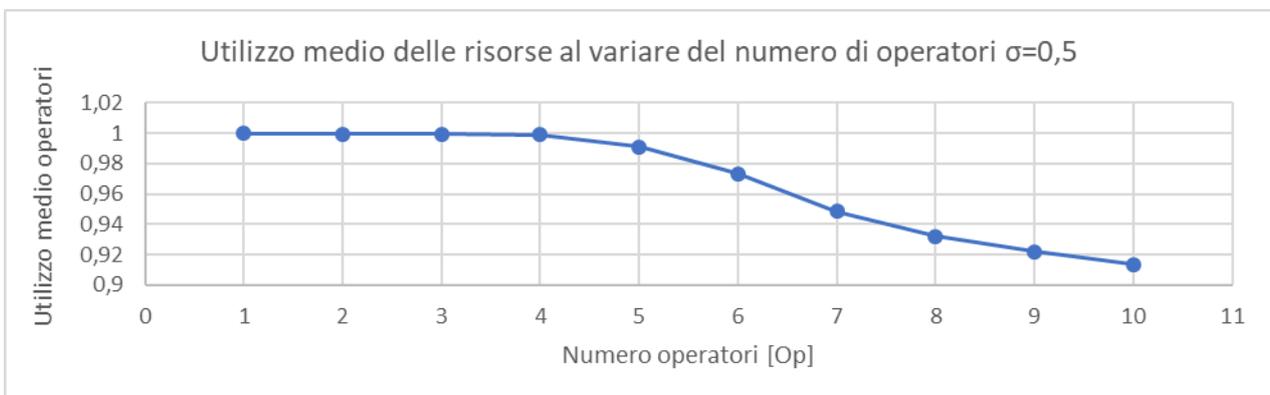


Figura 24 - Andamento dell'utilizzo medio dei walking worker con $\sigma = 0,5$, tempo di spostamento = 150 s

- $\sigma = 2,5$, tempo di spostamento = 150 s

Deviazione standard σ [minuti]	Tempo di spostamento [s]	Numero operatori [Op]	Tempo medio di lavorazione μ [minuti]	Output per operatore [pz/Op]	Utilizzo medio degli operatori
2,5	150	1	5	110,617	0,999997
2,5	150	2	5	109,5293	0,999489
2,5	150	3	5	108,1967	0,99796
2,5	150	4	5	106,5378	0,993848
2,5	150	5	5	104,3618	0,985696
2,5	150	6	5	101,8218	0,974098
2,5	150	7	5	99,28871	0,962237
2,5	150	8	5	97,01488	0,951722
2,5	150	9	5	95,01044	0,942672
2,5	150	10	5	93,23765	0,93501

Tabella 13 - Risultati simulazioni walking worker $\sigma = 2,5$, tempo di spostamento = 150 s

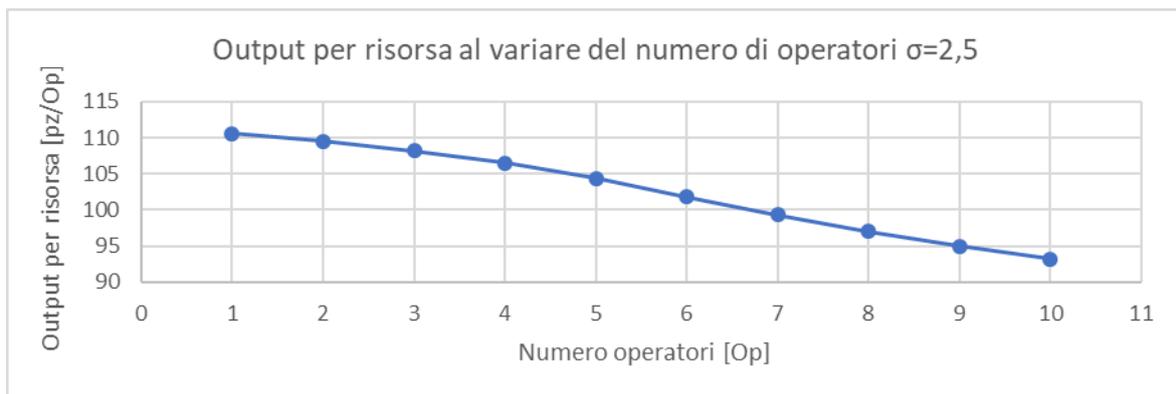


Figura 25 - Andamento dell'output medio per walking worker con $\sigma = 2,5$, tempo di spostamento = 150 s

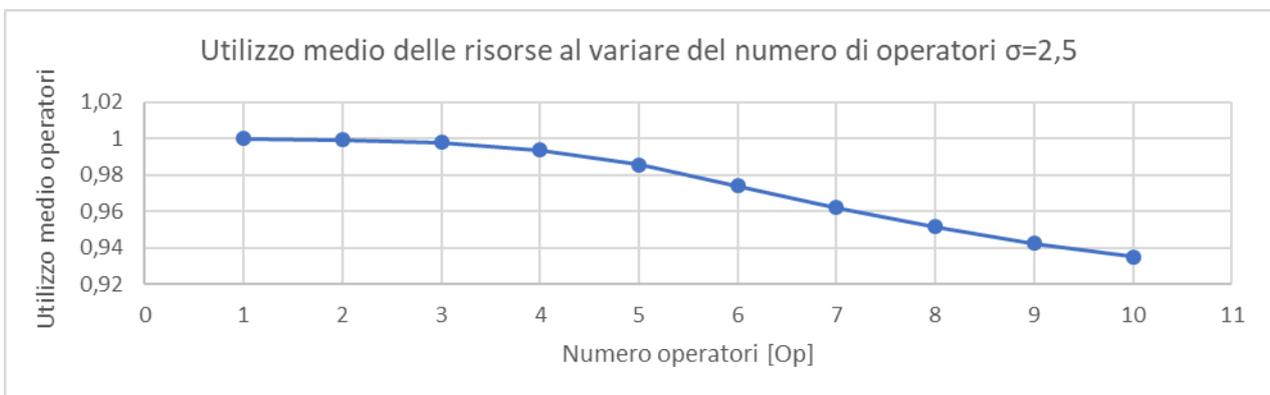


Figura 26 - Andamento dell'utilizzo medio dei walking worker con $\sigma = 2,5$, tempo di spostamento = 150 s

- $\sigma = 5$, tempo di spostamento = 150 s

Deviazione standard σ [minuti]	Tempo di spostamento [s]	Numero operatori [Op]	Tempo medio di lavorazione μ [minuti]	Output per operatore [pz/Op]	Utilizzo medio degli operatori
5	150	1	5	106,193	0,999997
5	150	2	5	103,842	0,998653
5	150	3	5	101,332	0,995264
5	150	4	5	98,63638	0,989584
5	150	5	5	95,8491	0,982083
5	150	6	5	92,98308	0,97359
5	150	7	5	90,25321	0,965208
5	150	8	5	87,62269	0,956948
5	150	9	5	85,0985	0,949157
5	150	10	5	82,709	0,94168

Tabella 14 - Risultati simulazioni walking worker $\sigma = 5$, tempo di spostamento = 150 s

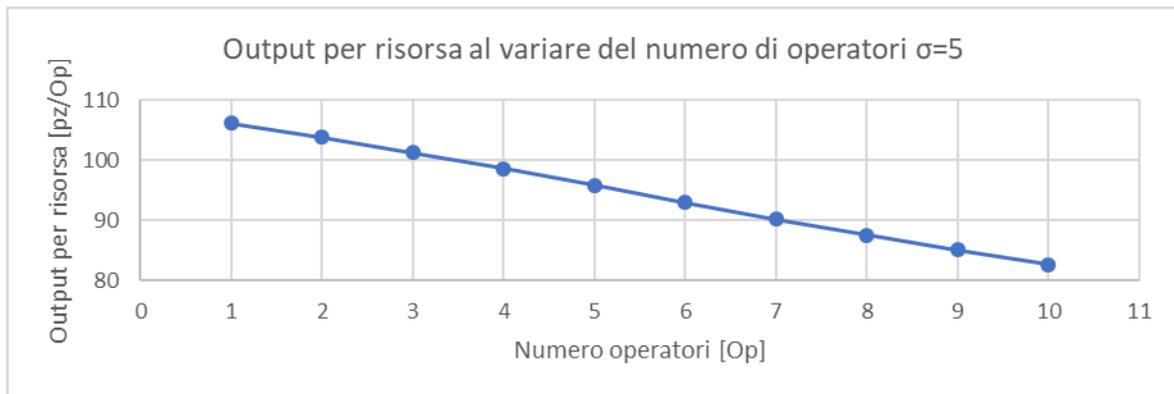


Figura 27 - Andamento dell'output medio per walking worker con $\sigma = 5$, tempo di spostamento = 150 s

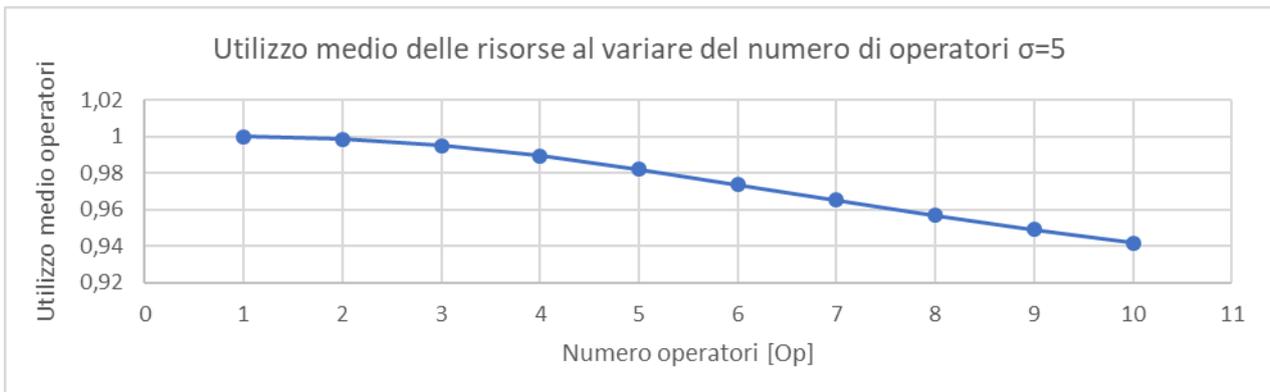


Figura 28 - Andamento dell'utilizzo medio dei walking worker con $\sigma = 5$, tempo di spostamento = 150 s

Alcune considerazioni dei risultati ottenuti: (alcune affermazioni vengono fatte rispetto ai risultati allegati)

- Utilizzo e numero operatori: per definizione gli operatori mobili lineari, studiati in questo documento, portano il pezzo dalla prima all'ultima stazione necessaria al suo ciclo produttivo. Per questo e l'ipotesi che un operatore più veloce non può superare uno più lento, finché il numero di operatori rimane inferiore al numero di stazioni si avrà un utilizzo abbastanza elevato ($\approx 0,9$). Questo è vero per un numero di operatori che cambia a seconda del valore delle variazioni del tempo di lavorazione e del tempo di trasporto. Infatti considerando una linea di 10 stazioni:
 - Sigma di 20 minuti, tempo medio di 5 minuti e time to travel trascurabile si ottiene un utilizzo maggiore di 0,9 se si hanno al massimo 6 operatori.
 - Sigma di 20 minuti, tempo medio di 5 minuti e time to travel pari a 5 secondi si ottiene un utilizzo maggiore di 0,9 fino anche a 10 operatori in alcuni casi.
 - Sigma di 5 minuti, tempo medio di 5 minuti e time to travel trascurabile si ottiene un utilizzo maggiore di 0,9 se si hanno al massimo 8 operatori, come si vede in tabella 15.
 - Sigma di 5 minuti, tempo medio di 5 minuti e time to travel pari a 2,5 secondi si ottiene un utilizzo maggiore di 0,9 anche con 10 operatori, tabella 8.
- Utilizzo medio operatori mobili e fissi: vengono considerate due categorie: con tempo di spostamento trascurabile (≈ 0) e con tempo di spostamento definito ($\neq 0$).
 - Il primo, un esempio è visibile in tabella 15 e figura 30, con un numero di operatori pari al numero di stazioni risulta avere un utilizzo medio pari a quello degli operatori fissi (0,74). Tale utilizzo è destinato a diminuire ancora all'aumentare delle variazioni del tempo di lavorazione. Un netto miglioramento si può notare diminuendo il numero di operatori. Così facendo gli operatori hanno meno possibilità di attendere che si liberi la stazione occupata dal lavoratore che li precede. Ovviamente tale soluzione non è applicabile al caso degli operatori fissi, che quindi non vengono sfruttati a pieno durante il tempo di produzione.
 - Il secondo, invece, le tabelle sopra riportate mostrano come il tempo di trasporto possa influire positivamente sull'utilizzo delle risorse durante il processo produttivo. Anche se la linea fosse influenzata da una variazione elevata del tempo di lavorazione, basta anche un tempo di spostamento relativamente basso per riportare l'utilizzo degli operatori sopra lo 0,9. Perciò avendo un tempo di spostamento diverso da zero, anche a parità di numero di operatori, l'utilizzo degli walking worker sarà sempre maggiore dei fixed worker.
 - Con piccole variazioni (i.e. $\sigma \leq 1,5$, con $\mu = 5$) la linea risulterà abbastanza bilanciata da garantire un buon utilizzo degli operatori fissi, con valori molto simili a quelli ottenibili con operatori mobili.
- Output walking worker con tempo di spostamento trascurabile: in tabella 15 e figura 29 sono presentati i risultati di una configurazione di una linea con tempo di spostamento considerato trascurabile. Come per l'utilizzo, se il numero di operatori è uguale al numero di stazioni l'output medio per operatore eguaglia quello della linea con operatori fissi. A questo punto però si può notare un aspetto molto importante di questa configurazione, che comunque rimane pressoché teorica ed ideale (time to travel non può essere prossimo a zero). Diminuendo il numero di operatori si ottiene un aumento considerevole dell'output dell'operatore, come si vede dall'andamento della curva in figura 29. Questo aumento porta a considerare l'output totale dalla linea. Prendendo i dati dalle tabelle di riferimento si ottengono i seguenti valori in uscita:
 - Operatori fissi: $Output = 143,7 * 10 = 1437$ pezzi

- Operatori mobili: $Output_{10op} = 143,6 * 10 = 1436$ pezzi

$$Output_{9op} = 159,1 * 9 = 1432 \text{ pezzi}$$

$$Output_{8op} = 175,1 * 8 = 1401 \text{ pezzi}$$

Da questi risultati si può dedurre che, idealmente, si può ridurre il numero di operatori senza influenzare in modo considerevole l'output complessivo della linea. Per un numero di operatori inferiore a 8, l'output complessivo si discosta in modo più marcato da quello ad operatori fissi. Un'ultima osservazione viene fatta su l'output medio per operatore, che per il modello con walking worker è maggiore rispetto ai fixed worker anche al variare del numero di operatori.

Deviazione standard σ [minuti]	Tempo medio di lavorazione μ [minuti]	Tempo di spostamento [s]	Numero operatori [Op]	Output per operatore [pz/Op]	Utilizzo medio degli operatori
5	5	0	1	189,804	0,999994
5	5	0	2	190,7073	0,999623
5	5	0	3	191,7713	0,999193
5	5	0	4	192,4664	0,998719
5	5	0	5	192,7165	0,997889
5	5	0	6	191,9985	0,992671
5	5	0	7	187,1165	0,966395
5	5	0	8	175,1249	0,904288
5	5	0	9	159,0741	0,820973
5	5	0	10	143,5985	0,741227

Tabella 15 - Risultati simulazioni walking worker $\sigma = 5$, tempo di spostamento = 0 s

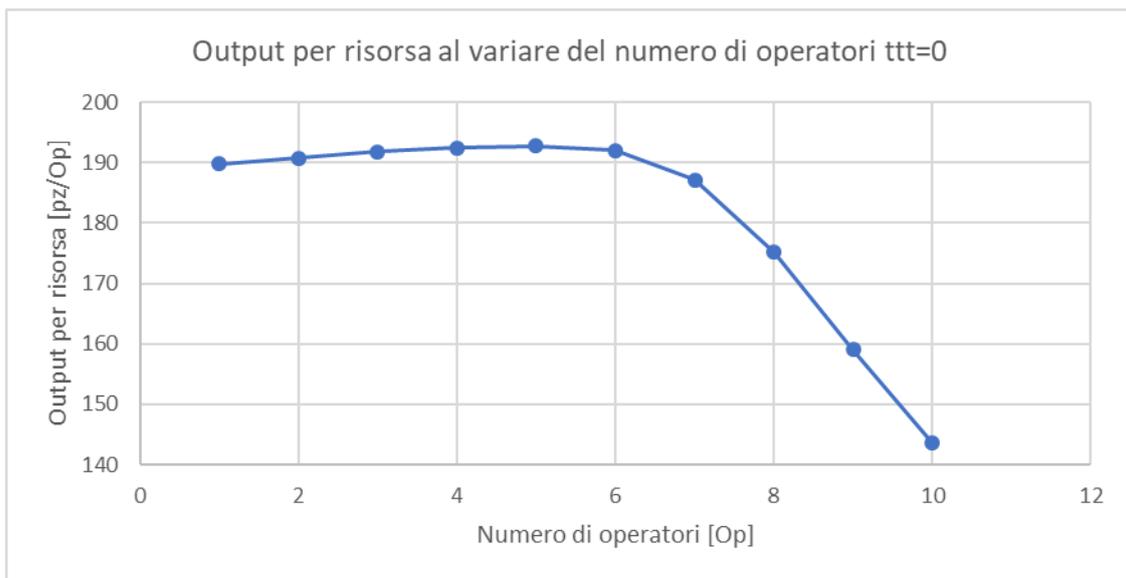


Figura 29 - Andamento dell'output medio per walking worker con $\sigma = 5$, tempo di spostamento = 0 s

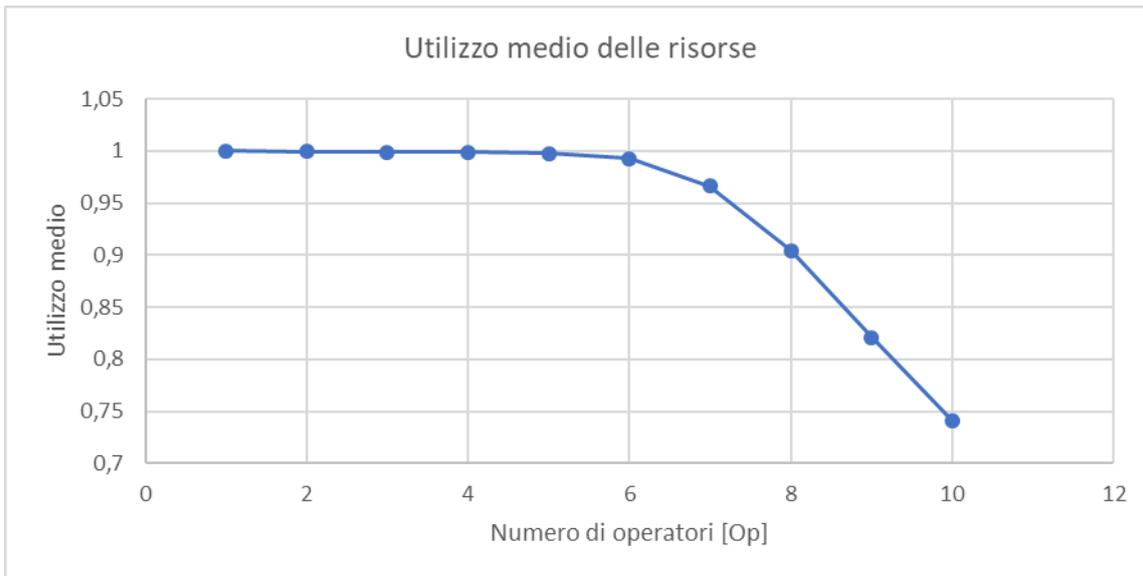


Figura 30 - Andamento dell'utilizzo medio dei walking worker con $\sigma=5$, tempo di spostamento = 0 s

- Output walking worker con tempo di spostamento non trascurabile: il time to travel in un modello più realistico non può essere considerato nullo. Infatti, prendendo i dati di tabella 8, che considera $\sigma = 5$ minuti, $\mu = 5$ minuti e time to travel = 2,5 secondi, è possibile vedere come l'output medio sia diminuito rispetto a quello di tabella 15 con tempo di spostamento trascurabile. Di conseguenza, per migliorare l'output medio e raggiungere lo stesso valore di produzione per operatore fisso è necessario portare il numero di operatori a 6 o inferiore. Aumentando questo tempo di trasferimento dell'operatore è possibile raggiungere la situazione descritta in tabella 14, dove neanche portando nella linea un solo operatore non si riesce ad eguagliare il risultato degli operatori fissi (104 contro 143 pezzi).

Quindi una linea ad operatori mobili, in determinate condizioni, può avere un output medio per risorsa maggiore rispetto ad una linea con postazioni fisse. A differenza di come detto al punto precedente, l'output medio complessivo degli walking worker resterà sempre inferiore ai fixed, senza mai raggiungerlo.

- Effetto della sigma: per gli operatori fissi un aumento della sigma significa una riduzione dell'output medio per risorsa e dell'utilizzo a seconda delle variazioni presenti. Comunque, considerando linee reali, dai risultati ottenuti, l'output complessivo della linea risulta essere il più grande realizzabile tra i due modelli. Per gli operatori mobili invece, tralasciando il caso con tempo di trasporto nullo, un aumento delle sigma porta una diminuzione dell'output medio per risorsa ma non influisce in modo importante sull'utilizzo. Inoltre diminuendo il numero di operatori è possibile migliorare l'output medio per operatore, sopperendo così alla riduzione dovuta alle variazioni.

Una linea organizzata con walking worker risulta più flessibile e più facile da riconfigurare per adattare le caratteristiche della produzione a quello che viene richiesto dal mercato o dall'azienda.

- Numero eccessivo di operatori: per la configurazione con operatori mobili avere un numero di risorse maggiore del numero di stazioni porta ad una riduzione notevole soprattutto dell'utilizzo medio, ma anche l'output medio per operatore ne risente. Perciò la configurazione migliore per tale metodo si ricerca in un numero di operatori che non superi il numero di postazioni della linea.

- È possibile realizzare dei grafici in cui risulta più semplice per l'azienda effettuare la scelta di quale metodo utilizzare, a seconda delle caratteristiche della linea di assemblaggio da realizzare. Di seguito vengono rappresentati i risultati relativi alle simulazioni con tempo medio di lavorazione pari a 5 minuti e time to travel di 2,5 secondi. Questi due sono, di solito, dati certi della linea di cui l'azienda è a conoscenza. Quindi fissati questi è possibile realizzare i grafici delle linee in funzione delle variazioni e del numero di operatori. In questo esempio vengono considerate le sigma da 0 a 5 minuti.

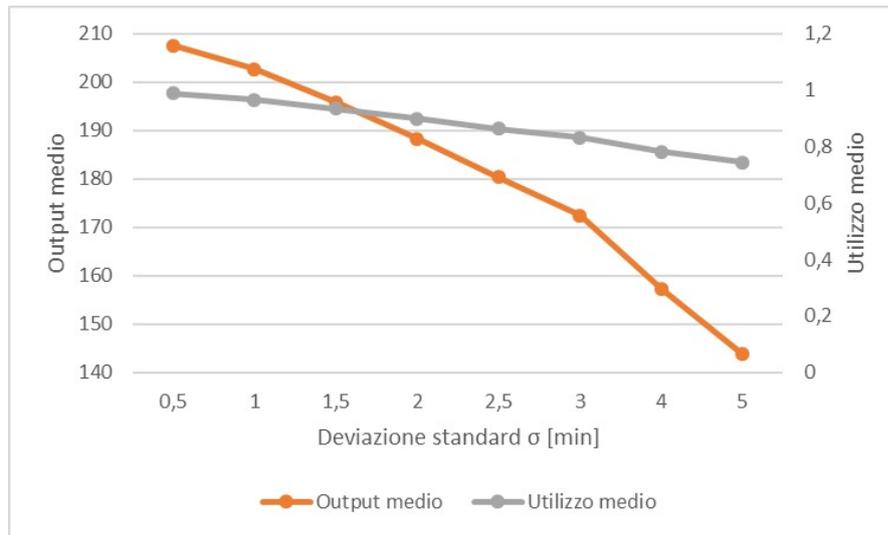


Figura 31 - Andamento dell'utilizzo e output medio dei fixed worker con $\mu = 5$ minuti, tempo di spostamento = 2,5 s

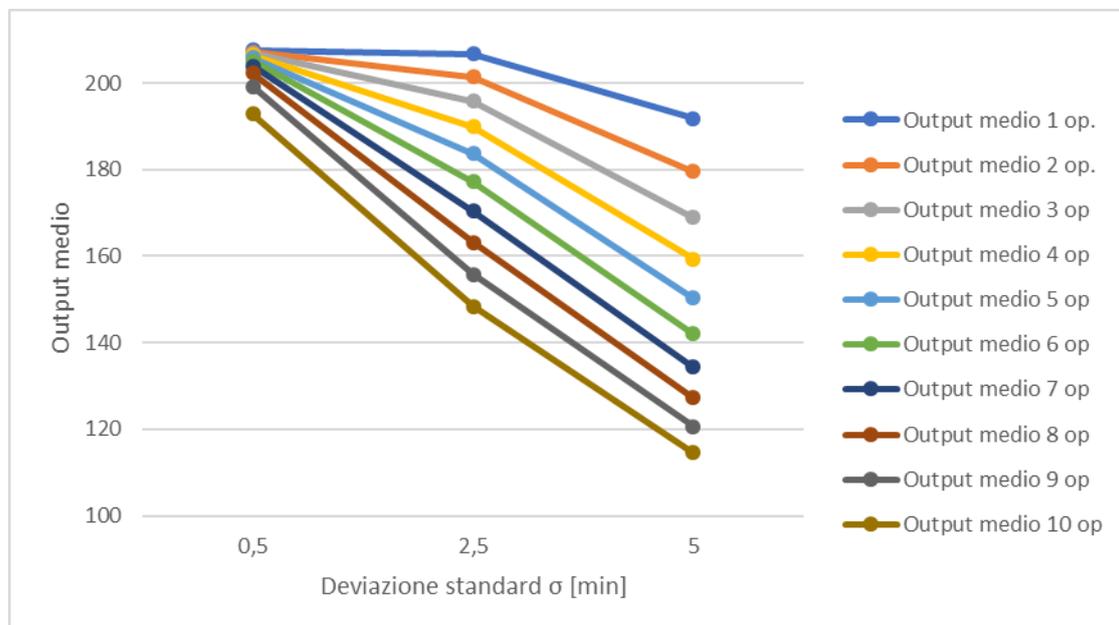


Figura 32 - Andamento dell'output medio dei walking worker con $\mu = 5$ minuti, tempo di spostamento = 2,5 s

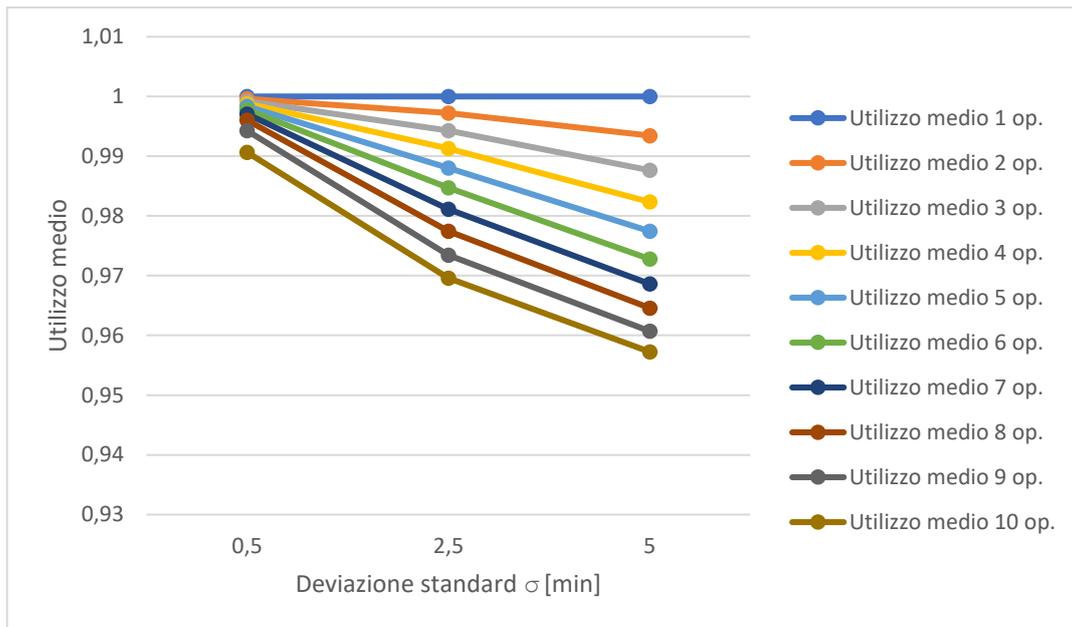


Figura 33 - Andamento dell'utilizzo medio dei walking worker con $\mu = 5$ minuti, tempo di spostamento = 2,5 s

In questo modo è possibile, individuate le possibili variazioni del ciclo produttivo, scegliere quale configurazione sia migliore per soddisfare le richieste di produzione o di utilizzo delle risorse. Infatti, si può vedere come per una sigma di 5 minuti sia possibile avere un utilizzo maggiore utilizzando anche 10 operatori mobili invece di fissi. Per quanto riguarda l'output medio per operatore fisso viene eguagliato quando vengono utilizzati 6 operatori mobili. Se non è richiesta un'elevata domanda in un breve periodo, questa riduzione permette un notevole risparmio economico all'azienda, che può reimpiegare le risorse rimaste in altre operazioni.

Queste considerazioni sono state fatte guardando ai risultati ottenuti con tempi medi di 5 minuti. Per i tempi di 10, 15 e 20 minuti questa analisi può essere ripresa senza fondamentali cambiamenti, ovviamente tenendo conto di come cambiano i parametri. Ad esempio, i punti dell'output degli walking worker dove si considera $\sigma = 5$ e $\mu = 5$ possono essere considerati veritieri anche nel caso $\sigma = 10$ e $\mu = 10$.

4. CONCLUSIONI

Questo documento presenta uno studio su l'organizzazione delle risorse nelle linee di assemblaggio attraverso l'implementazione di due modelli per la realizzazione di simulazioni al computer e l'analisi matematica dei risultati. Questi due modelli riguardano due dei metodi utilizzati oggi per le linee di assemblaggio: l'uso di operatori fissi e di operatori mobili. Si cerca di fornire uno strumento che permetta di ottenere una prima configurazione della linea in base ad alcuni parametri caratteristici: tempo medio di lavorazione, variazioni dei tempi di lavorazione, numero di operatori e tempo di spostamento. Attraverso il confronto dei risultati dei due modelli si determina quale dei due metodi è il più adatto in una precisa situazione. L'attenzione si è basata principalmente su la determinazione dell'output medio per operatore e l'utilizzo medio degli operatori utilizzati nella linea. Trovare questi valori è importante perché se un'azienda necessita un certo output per un prodotto o vuole un mantenere un utilizzo minimo degli operatori, grazie a questo strumento può approssimare la struttura di una prima linea di assemblaggio in modo rapido e successivamente verrà perfezionata.

Lo studio conclude che se l'azienda necessita di un output elevato in un determinato periodo e la linea si può definire ben bilanciata (piccole variazioni nel tempo di lavorazione), la configurazione migliore è quella tradizionale degli operatori fissi. Lo stesso vale al crescere delle variazioni se l'azienda comunque necessita di produrre elevate quantità, sacrificando però l'utilizzo degli operatori. Questo perché dall'analisi dei risultati si evince che la configurazione che comunque garantisce il maggior output è quella con fixed worker. Se invece l'azienda è soggetta ad una domanda molto variabile riguardo diversi prodotti, si è visto che il metodo con walking worker è più adatto per essere riconfigurato nel breve periodo. Infatti variando il numero di operatori, precedentemente formati, è possibile adattare l'output della linea mantenendo un utilizzo relativamente elevato. Si è visto anche come il tempo di spostamento è da tenere in considerazione, in quanto anche questo parametro influenza principalmente l'output medio delle risorse.

Se il time to travel dell'operatore è trascurabile, si è evidenziato come si possono ottenere utilizzo maggiore e output della linea uguale alla configurazione ad operatori fissi con un numero minore di operatori.

Un principale difetto di questo modello è l'impossibilità di un operatore più veloce di superare un operatore più lento. Nel caso dei modelli analizzati, la legge del tempo di lavorazione alle stazioni era uguale per tutte le stazioni e anche il tempo di spostamento per gli operatori tra una stazione e l'altra è costante, così evitando questo evento. Però in una linea reale si deve tenere in considerazione anche questo fenomeno. Tale deriva da i cosiddetti fattori umani, che sono difficilmente simulabili nei modelli.

Per ottenere risultati certi si dovrebbe cercare di realizzare un modello dove si considerano regole più complesse per la simulazione di una linea più realistica. Comunque, utilizzando un modello approssimato è possibile determinare quale tra le due configurazioni studiate in questo documento sia la migliore per soddisfare certe richieste.

La soluzione migliore sarebbe utilizzare i fixed worker in linee ben bilanciate e con quantità da produrre elevate, mentre utilizzare i walking workers quando si necessita di riconfigurare spesso la linea per rispondere ad una domanda variabile di prodotti e quando la linea presenta elevate variazioni nei tempi di lavorazione.

BIBLIOGRAFIA

Wang, Q., Owen, G. W., & Mileham, A. R. (2005). Comparison between fixed-and walking-worker assembly lines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 219(11), 845-848

Wang, Q., Owen, G. W., & Mileham, A. R. (2007). Determining numbers of workstations and operators for a linear walking-worker assembly line. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20(1), 1-10

Wang, Q., Lassalle, S., Mileham, A. R., & Owen, G. W. (2009). 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

Mileham A. R., Jeffries A. W., Owen G. W., Pellegrin F. *The design and performance of walking-fitter assembly lines*. In Proceedings of 16th International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future (CARS & FOF 2000), Trinidad and Tobago, 2000, pp. 325–332