

**POLITECNICO DI TORINO**

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria**

**Meccanica**

**A.A. 2023/2024**



**L'impatto della variabilità nei  
problemi di Buffer Allocation: una  
review bibliografica**

**Relatore:**

**Prof.ssa Arianna Alfieri**

**Correlatore:**

**Prof.ssa Erica Pastore**

**Candidato:**

**Gabriele Greco**

# INDICE

<b>1. Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2. BAP: BUFFER ALLOCATION PROBLEM</b>	<b>4</b>
2.1 Definizione del BAP	4
2.2 BAP1: Massimizzazione del throughput	6
2.3 BAP2: Minimizzazione dimensione totale buffer	11
2.4 Ulteriori formulazioni BAP	14
<b>3. Variabilità nel contesto del Buffer Allocation Problem</b>	<b>18</b>
3.1 Parametri di misura delle prestazioni della linea	20
3.2 Legge della variabilità	21
3.2.1 Influenza dei tempi di processo	21
3.2.2 Distribuzione dei tempi processo e dell'inter-departure Time	22
3.2 relazioni tra variabilità e parametri di progetto	24
3.2.1 Dimensione dei buffer e lunghezza della linea	24
3.2.2 Variabilità dell'allocazione lungo il flusso produttivo.	25
3.3 Quantificare l'impatto della variabilità sulle prestazioni di una linea	27
3.4 Relazione tra variabilità e WIP	28
3.4.1 Definizione WIP	28
3.4.2 Come il WIP influenza la variabilità	28
<b>4. Lacune presenti in letteratura</b>	<b>31</b>
<b>5. Conclusioni</b>	<b>33</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>35</b>

## 1.Introduzione

La gestione della produzione risulta un ambito dalla complessità crescente, il suo studio è chiaramente centrato in una massimizzazione dell'efficienza collegata all'ottimizzazione delle prestazioni della linea di produzione.

In questo contesto, uno dei principali problemi risulta essere il Buffer Allocation Problem indicato come BAP.

Tale complicato argomento richiede una comprensione dettagliata per raggiungere l'obiettivo sopra citato.

La corretta allocazione delle risorse buffer lungo un sistema produttivo è fondamentale per garantire la migliore funzionalità possibile del sistema stesso.

La trattazione del BAP in letteratura è ampiamente approfondita, gli studi hanno dimostrato che l'allocazione ottimale dei buffer dipende da numerose caratteristiche del sistema, tra le quali la variabilità ha un impatto notevole. L'analisi della variabilità nel contesto del BAP è di fondamentale importanza per comprendere come essa incida sui parametri chiave come, i tempi di processo, l'allocazione dei buffer e il Work-In-Progress (WIP), pertanto, il suo studio risulta una sfida da affrontare per garantire la solidità del sistema produttivo.

Scopo del presente lavoro è quello di analizzare criticamente la letteratura esistente sull'argomento della variabilità nei sistemi produttivi, tuttavia, al fine di fornire una visione più completa, viene inizialmente proposta una panoramica generale sul contesto BAP, riconoscendo l'importanza di

sviluppare delle strategie per integrare efficacemente la gestione dei buffer con la gestione della variabilità.

Per la conduzione del presente elaborato, sono state condotte approfondite indagini attraverso diverse piattaforme di ricerca tra cui Google Scholar, Scopus e la biblioteca di Ateneo del Politecnico di Torino. L'utilizzo di tali risorse è stato finalizzato all'individuazione di articoli prettamente di carattere scientifico inerenti alle tematiche trattate nel contesto di questo elaborato.

Al fine di ottimizzare la ricerca, considerando la vasta presenza di letteratura sull'argomento, si è deciso di discriminare gli articoli nel seguente modo:

Inizialmente si è condotta una ricerca di carattere generale in modo da acquisire una visione di insieme approfondita della problematica trattata. Successivamente sono stati analizzati gli articoli focalizzati sulla risoluzione del BAP1, quelli incentrati sulla risoluzione del BAP2 e infine sono stati esaminati gli articoli dedicati allo studio della variabilità.

A seguito della discriminazione effettuata la tesi è stata organizzata in 3 capitoli principali:

- Nel primo viene definito il BAP e se ne forniscono le principali trattazioni indicandone infine gli orientamenti degli ultimi studi;
- Il secondo capitolo, di fondamentale importanza nella trattazione dell'elaborato si dedica all'analisi della variabilità. Verranno esaminati i parametri di misura delle prestazioni della linea, la legge della variabilità e la relazione tra variabilità e i parametri di progetto di una linea produttiva. L'obiettivo di questo capitolo è quello di descrivere come una gestione focalizzata sulla variabilità possa impattare

positivamente sulla problematica legata all'introduzione di buffer in una linea produttiva.

- Nel capitolo conclusivo del presente elaborato, si offre una sintesi delle lacune identificate nella letteratura in relazione alla gestione della variabilità nell'ambito della produzione industriale, in base a quelle già presentate dagli autori degli articoli presenti in bibliografia.

## 2. BAP: BUFFER ALLOCATION PROBLEM

L'analisi del Buffer Allocation Problem è ritenuta utile e funzionale per meglio comprendere il contesto nel quale si colloca l'argomento principale della presente tesi. A tal fine, gli articoli riportati in questo capitolo, tratti dalla letteratura di settore, vengono esaminati in maniera sintetica non focalizzandosi su nessuna delle problematiche proposte.

### **2.1 Definizione del BAP**

L'introduzione di buffer lungo la catena di produzione riveste un'importanza fondamentale in quanto consente di affrontare le variabilità e le incertezze che possono manifestarsi nel processo produttivo.

Tale necessità trova fondamento in diversi principi gestionali e di ottimizzazione che caratterizzano l'ambito della produzione.

Uno degli aspetti principali è senza alcun dubbio la gestione della variabilità in quanto la produzione è soggetta a fluttuazioni nella domanda, nei tempi di ciclo e nella velocità di produzione.

L'introduzione dei buffer in una linea permette una riduzione delle casistiche di blocco e un moderato aumento della capacità della linea produttiva ad adattarsi a cambiamenti improvvisi nel flusso di lavoro.

Un ulteriore vantaggio derivante dall'inserimento dei buffer è una notevole riduzione dei "tempi morti" poiché, in assenza di buffer nella linea, si presenterebbero maggiori rallentamenti o interruzioni durante la fase produttiva, che potrebbero portare all'arresto dell'intera linea: a valle

perché arrivati all'interruzione non si potrebbe più scaricare il pezzo, mentre a monte poiché non ci sarebbe alcun pezzo da lavorare. La presenza di buffer invece consente di diminuire questa probabilità, mantenendo la produzione attiva anche con la presenza di interruzioni momentanee.

Collegato al vantaggio appena descritto troviamo anche la sincronizzazione delle lavorazioni, avendo ogni fase del processo un diverso ritmo produttivo, l'inserimento dei buffer diminuisce notevolmente la dipendenza di una fase con la fase che la precede.

L'introduzione di buffer porta anche ad un aumento della flessibilità della linea produttiva garantendo una maggiore capacità ad affrontare variazioni improvvise nella domanda di mercato e altre variabili che vanno ad influenzare il flusso operativo.

L'allocazione di buffer però non risulta così immediata come sembra, è fondamentale trovare il giusto equilibrio per non trasformare un elemento positivo in qualcosa che comporti sprechi di risorse.

Il Buffer Allocation Problem (BAP) è ampiamente studiato in letteratura con l'obiettivo di migliorare l'efficienza del sistema produttivo, nel seguito si riportano e si confrontano delle diverse formulazioni del BAP.

## **2.2 BAP1: Massimizzazione del throughput**

Successivamente ad un'analisi della letteratura scientifica presente si è notato come la formulazione del BAP più studiata è quella che in questa tesi viene indicata come BAP1, in questo paragrafo della tesi ne analizzeremo la trattazione tramite l'esposizione di diversi articoli considerati utili per tale esposizione .

Il BAP1 ha come obiettivo primario la massimizzazione del throughput sotto diverse ipotesi iniziali.

Un'illustrazione schematica del problema, come proposto da Gershwin e Schor (Gershwin and Schor, 2000) è la seguente:

$$\begin{aligned} & \max P(N_1, \dots, N_{k-1}) \\ & \text{soggetto a } N^{TOTALE} = \sum_{i=1}^{k-1} N_i; \\ & N_i \geq N^{MIN}, \quad i = 1, \dots, k - 1 \end{aligned}$$

Dove:

- P rappresenta il throughput;
- $N^{TOTALE}$  indica lo spazio totale dei buffer ed è un valore fissato;
- $(N_1, \dots, N_{k-1})$  denotano le dimensioni dei buffer;
- k rappresenta il numero di macchine coinvolte;
- k-1 rappresenta il numero delle stazioni dei buffer;

Il problema richiede la massimizzazione del throughput, soggetto al vincolo che la somma delle dimensioni dei buffer sia uguale allo spazio totale

assegnato e che ciascuna dimensione di buffer sia maggiore o uguale ad una specifica dimensione minima  $N^{MIN}$ .

L'input del problema è rappresentato da  $N^{TOTALE}$  mentre gli output ricercati sono  $(N_1, \dots, N_{k-1})$  i quali conducono al raggiungimento del valore massimo del throughput,  $P^{MAX}$ .

Gershwin e Schor hanno applicato il loro algoritmo ad una linea di produzione composta da tre macchine e due sistemi di buffer.

Di seguito è riportato il grafico che correla  $N^{TOTALE}$  con  $P^{MAX}$  (Fig.1).

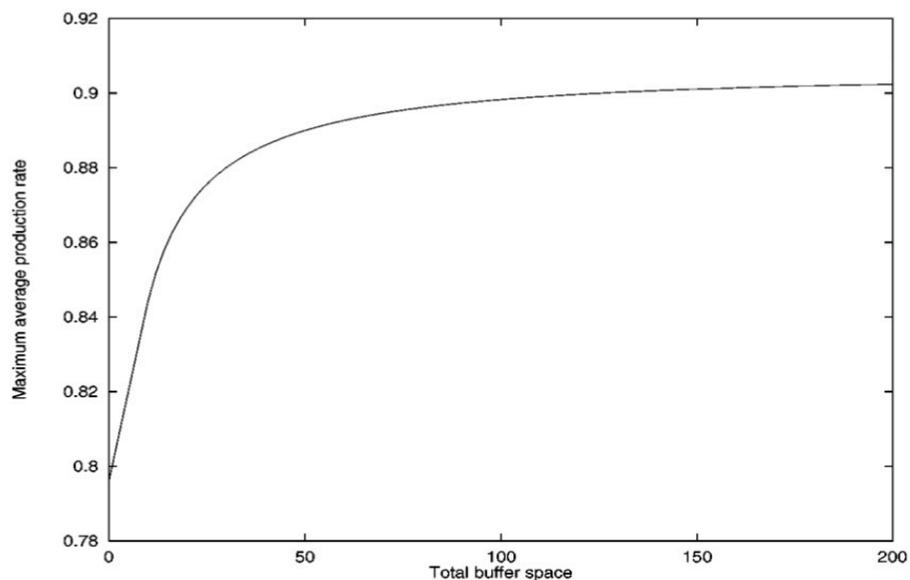


Fig.1  $N^{TOTALE}$  vs  $P^{MAX}$  (Gershwin and Schor, 2000).

Tale grafico illustra chiaramente come  $P^{MAX}(N^{TOTALE})$  manifesti un aumento monotono rispetto a  $N^{TOTALE}$ .

Per ottenere  $P^{MAX}$ , si rivela necessaria una distribuzione dei buffer sulla linea produttiva che assuma una forma caratteristica denominata “bowl effect”, concentrando quindi il numero massimo di spazio per i buffer nella parte centrale della linea.

Un’analisi più approfondita sulla distribuzione dei buffer nelle linee di produzione è presentata nello studio condotto da F. T. S. Chan e E. Y. H. Ng (F. T. S. Chan and E. Y. H. Ng, 2002) il quale fa riferimento ad una linea con sei workstation, per una migliore comprensione si riporta lo schema (Fig.2).

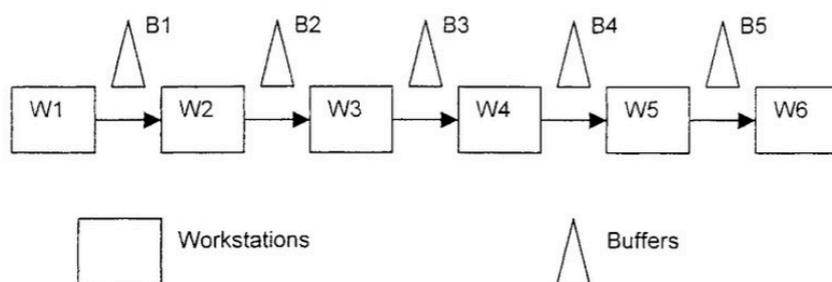


Fig.2 modello di linea con sei workstation (F. T. S. Chan and E. Y. H. Ng, 2002).

F. T. S. Chan e E. Y. H. Ng conducono 7 esperimenti in cui variano il numero totale di buffer ed esplorano quattro diverse distribuzioni possibili.

Dai risultati di tali esperimenti emerge costantemente che la distribuzione uniforme nelle cinque allocazioni B1, B2, B3, B4 e B5 è subottimale.

La distribuzione secondo la “regola di Chow” (Chow, 1987) emerge spesso come la scelta più favorevole, ma tale approccio risulta carente nel considerare colli di bottiglia, una problematica comune nelle linee di produzione, pertanto, è sconsigliato.

Il risultato conclusivo evidenzia che, per un numero totale di buffer relativamente limitato la “regola di C&N” (F. T. S. Chan and E. Y. H. Ng, 2002) è preferibile, mentre in presenza di un numero elevato di buffer la “regola di L&L” (C. M. Liu and C. L. Lin ,1994) rappresenta una scelta più adatta garantendo migliori prestazioni. Queste raccomandazioni si basano su considerazioni specifiche degli algoritmi associati a ciascuna regola che, per ulteriori dettagli si suggerisce di consultare.

Allocare i buffer secondo un approccio che segua il “bowl effect” è altresì supportato da I. Sabuncuoglu et al. nel loro articolo (Sabuncuoglu et al. ,2006). In questo contesto, viene affermato che *“l’allocazione ottimale dei buffer solitamente segue una forma di “inverted bowl”, assegnando quindi più buffer alle stazioni centrali”*.

Tuttavia, in presenza di colli di bottiglia lungo la linea, il posizionamento dei buffer è soggetto a variazioni. Il lavoro di Sabuncuoglu et al. evidenzia che un collo di bottiglia attira un maggior numero di unità di buffer nelle stazioni adiacenti. Nel caso in cui vi siano più colli di bottiglia, attira più unità buffer quello più prossimo al centro della linea.

Considerazioni analoghe sono presentate anche nello studio di Gershwin e Schor (Gershwin and Schor, 2000), i quali, pur affrontando il tema in maniera molto meno approfondita giungono a conclusioni simili come si riporta nello schema in Fig.3.

### Optimal Buffer Space Distribution

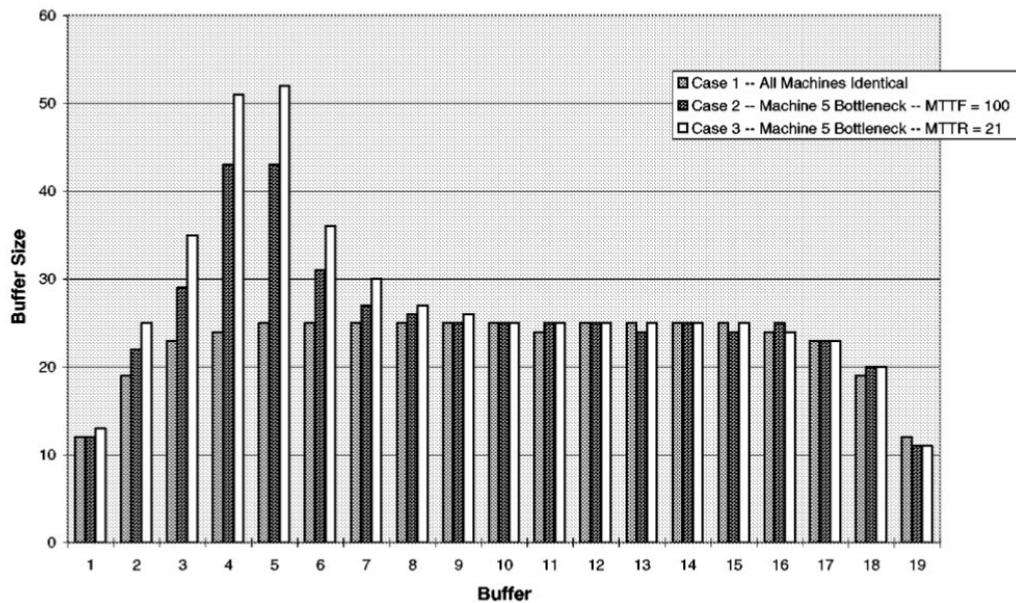


Fig.3 Distribuzione ottimale dei buffer (Gershwin and Schor, 2000)

Vale la pena notare che, nell'ambito del presente lavoro, per la descrizione del BAP1 sono stati esaminati esclusivamente articoli che trattano delle strutture in linea. Sebbene alcuni di questi articoli indichino che le stesse considerazioni possono essere applicate a strutture differenti, si sottolinea che tali situazioni potrebbero risultare comunque più complesse da analizzare e comprendere.

### **2.3 BAP2: Minimizzazione dimensione totale buffer**

Il BAP2 si configura come un problema volto alla minimizzazione della dimensione totale dei buffer, vincolando il throughput della linea ad un valore minimo predefinito.

Volendo mantenere le stesse notazioni del BAP1 si riporta la schematizzazione del problema formulata da Gershwin e Schor (Gershwin and Schor, 2000), avendo constatato che anche gli altri articoli confrontati presentano una struttura concettuale simile seppure adottando notazioni differenti.

$$\begin{aligned} \text{Min } N^{TOTALE} &= \sum_{i=1}^{k-1} N_i; \\ \text{soggetto a } P(N_1, \dots, N_{k-1}) &\geq P^* \\ N_i &\geq N^{MIN}, \quad i = 1, \dots, k - 1 \end{aligned}$$

In questa formulazione, l'obiettivo è la riduzione della dimensione totale dei buffer  $N^{TOTALE}$ , vincolata dal requisito che il throughput sia maggiore o al più uguale ad un valore  $P^*$  prefissato e che ciascuna dimensione di buffer sia maggiore o uguale ad una specifica dimensione minima  $N^{MIN}$ .

Questa articolazione del problema risulta più complessa rispetto al BAP1, in quanto il vincolo  $P \geq P^*$  non può essere rappresentato in forma chiusa.

Pertanto, Gershwin e Schor propongono una soluzione iterativa, collegata alla loro formulazione del BAP1. L'approccio consiste nell'iniziare con un certo valore di  $N^j$  e calcolare il massimo throughput ottenibile, incrementando

iterativamente il valore di  $N^j$  fino a quando il throughput calcolato non raggiunge  $P^*$ .

Anche Hideaki Yamashita e Tayfur Altioek (Hideaki Yamashita e Tayfur Altioek,1998) propongono un algoritmo iterativo per risolvere il BAP2 adottando un approccio differente per il calcolo del throughput ottenibile.

Per una migliore comprensione, nel loro studio vengono effettuati degli esempi numerici relativi a linee di produzione con tre e cinque stazioni.

Si riporta la prima casistica citata.

Example	Stations ( Avg. Proc. Time/Cv <sup>2</sup> )			DP $\bar{o}_{dp}$	Simulation (output rate, 95%CI, buffer allocation)		
	1	2	3		$\bar{o}$	$\bar{o}_0$	$\bar{o}_m$
<b>1.1</b> $\bar{\lambda}_d = 0.37$	2.0/0.25	2.0/0.25	2.0/0.25	0.3777 (3,2)	0.4312 (±0.0005) (3,2)	0.3564 (±0.0004) (1,1)	0.4661 (±0.0007) (5,5)
<b>1.2</b> $\bar{\lambda}_d = 0.37$	2.0/0.75	2.0/0.75	2.0/0.75	0.3725 (3,3)	0.3865* (3,3)	0.2973* (1,1)	0.4216* (5,5)
<b>1.3</b> $\bar{\lambda}_d = 0.30$	2.0/2.5	2.0/2.5	2.0/2.5	0.3151 (3,2)	0.2962* (3,2)	0.2453* (1,1)	0.3452* (5,5)
<b>2.1</b> $\bar{\lambda}_d = 0.22$	2.0/0.25	4.0/0.25	3.0/0.25	0.2201 (2,2)	0.2416 (±0.0003) (2,2)	0.2175 (±0.0002) (1,1)	0.2497 (±0.0004) (5,5)
<b>2.2</b> $\bar{\lambda}_d = 0.22$	2.0/0.75	4.0/0.75	3.0/0.75	0.2244 (3,3)	0.2298* (3,3)	0.1870* (1,1)	0.2423* (5,5)
<b>2.3</b> $\bar{\lambda}_d = 0.20$	2.0/2.5	4.0/2.5	3/2.5	0.2045 (3,3)	0.1944* (3,3)	0.1585* (1,1)	0.2124* (5,5)
<b>3.1</b> $\bar{\lambda}_d = 0.37$	2.0/0.25	2.0/0.75	2.0/2.5	0.3760 (4,5)	0.3940 (±0.0009) (4,5)	0.2868 (±0.0004) (1,1)	0.3982 (±0.0011) (5,5)
<b>3.2</b> $\bar{\lambda}_d = 0.37$	2.0/0.75	2.0/2.5	2.0/0.25	0.3757 (4,3)	0.3714 (±0.0008) (4,3)	0.2891 (±0.0008) (1,1)	0.3934 (±0.0010) (5,5)
<b>3.3</b> $\bar{\lambda}_d = 0.37$	2.0/2.5	2.0/0.25	2.0/0.75	0.3816 (3,3)	0.3674 (±0.0007) (3,3)	0.2858 (±0.0006) (1,1)	0.4036 (±0.0008) (5,5)
<b>4.1</b> $\bar{\lambda}_d = 0.22$	2.0/0.25	4.0/0.75	3.0/2.5	0.2220 (3,5)	0.2262 (±0.0006) (3,5)	0.1776 (±0.0005) (1,1)	0.2350 (±0.0004) (7,7)
<b>4.2</b> $\bar{\lambda}_d = 0.22$	2.0/0.75	4.0/2.5	3.0/0.25	0.2252 (3,3)	0.2178 (±0.0006) (3,3)	0.1812 (±0.0004) (1,1)	0.2392 (±0.0009) (7,7)
<b>4.3</b> $\bar{\lambda}_d = 0.22$	2.0/2.5	4.0/0.25	3.0/0.75	0.2238 (2,3)	0.2246 (±0.0005) (2,3)	0.1875 (±0.0003) (1,1)	0.2480 (±0.0004) (7,7)

Fig.4 Buffer Allocation in una linea con tre stazioni produttive

Analizzando le ultime tre colonne si evidenziano, in sequenza:

- il throughput della linea ottenuta con l'algoritmo (quindi con il numero minimo di buffer);
- il throughput della linea in assenza di buffer;
- il throughput della linea con il numero massimo di buffer.

Si osserva che il valore del throughput varia quasi sempre in modo trascurabile tra la linea con il numero massimo di buffer e il throughput della linea ottenuta tramite l'algoritmo quindi con la minimizzazione di  $N^{TOTALE}$ . Ciò fa comprendere come ad una minima riduzione del throughput può essere associato un notevole risparmio in termini di  $N^{TOTALE}$  e collegato ad esso, anche un possibile risparmio in termini di costi e di spazi dedicati alla linea.

In letteratura gli studi dedicati esclusivamente alla risoluzione del BAP2 risultano meno numerosi rispetto a quelli che trattano il BAP1.

La complessità della formulazione spinge gli autori degli articoli analizzati a formulare ipotesi o adattare metodologie iterative per poter trattare il problema in maniera simile al BAP1.

## **2.4 Ulteriori formulazioni BAP**

Nonostante il Buffer Allocation Problem (BAP) abbia ricevuto un considerevole grado di attenzione in letteratura la sua risoluzione definitiva, vista la complessità dell'argomento, resta ancora aperta.

In particolare, gli sforzi investigativi degli ultimi anni si sono focalizzati sull'analisi di obiettivi multipli con il fine di individuare soluzioni specifiche in accordo con gli scopi predefiniti.

Numerosi studi, ad esempio, mirano a trovare il compromesso ottimale tra BAP1 e BAP2 mediante l'applicazione di diversi approcci.

Al contempo, altri ricercatori si dedicano all'identificazione di nuovi obiettivi in modo da direzionare il futuro degli studi nel settore.

Un esempio della prima casistica è rappresentato dall'articolo di Chehade H. et al. Ad (Chehade H., et al, 2010). L'attenzione di questo studio è centrata sul dimensionamento dei buffer in una linea produttiva, in cui le dimensioni di ciascun buffer sono vincolate da valori limite. L'obiettivo primario consiste nel raggiungere un compromesso ottimale tra BAP1 e BAP2 avvalendosi di un algoritmo Ant Colony Optimization (ACO) risolvendolo attraverso la relazione di Lorenz, una metodologia differente rispetto ai consueti approcci impiegati in algoritmi di questo tipo.

I risultati della ricerca indicano una performance positiva dell'algoritmo proposto. Tuttavia, essendo soluzioni metaeuristiche, gli autori sottolineano l'opportunità di sviluppare metodi esatti, concordi con l'obiettivo della loro ricerca, al fine di consentire un confronto più accurato con il loro studio.

Un'ulteriore prospettiva innovativa nell'approccio al BAP emerge dalla considerazione di questioni rilevanti per l'economia globale contemporanea come ad esempio l'efficienza energetica.

Tale prospettiva viene esplorata in uno studio condotto da Alaouchiche, Yasmine, et al. (Alaouchiche, Yasmine, et al.,2021) in cui gli autori specificano: *“Il BAP è ampiamente studiato in letteratura, poiché i buffer hanno un grande impatto sul miglioramento dell'efficienza dei sistemi produttivi, soprattutto per la produzione di massa. Tuttavia, con tutti i cambiamenti imminenti nell'economia mondiale, nelle esigenze industriali e nella consapevolezza ecologica, la necessità di considerare l'efficienza energetica nella progettazione dei sistemi produttivi diventa cruciale”* (Alaouchiche, Yasmine, et al.,2021).

Il nuovo problema proposto viene denominato EE-BAP così come fatto dagli autori.

Per valutare le prestazioni della linea nel contesto di EE-BAP viene impiegato il throughput calcolato con il metodo della macchina equivalente (EMM) (Ouazene,Yassine, et al., 2013).

Vengono effettuati tre diversi esperimenti, per chiarezza esplicativa se ne riporta esclusivamente uno.

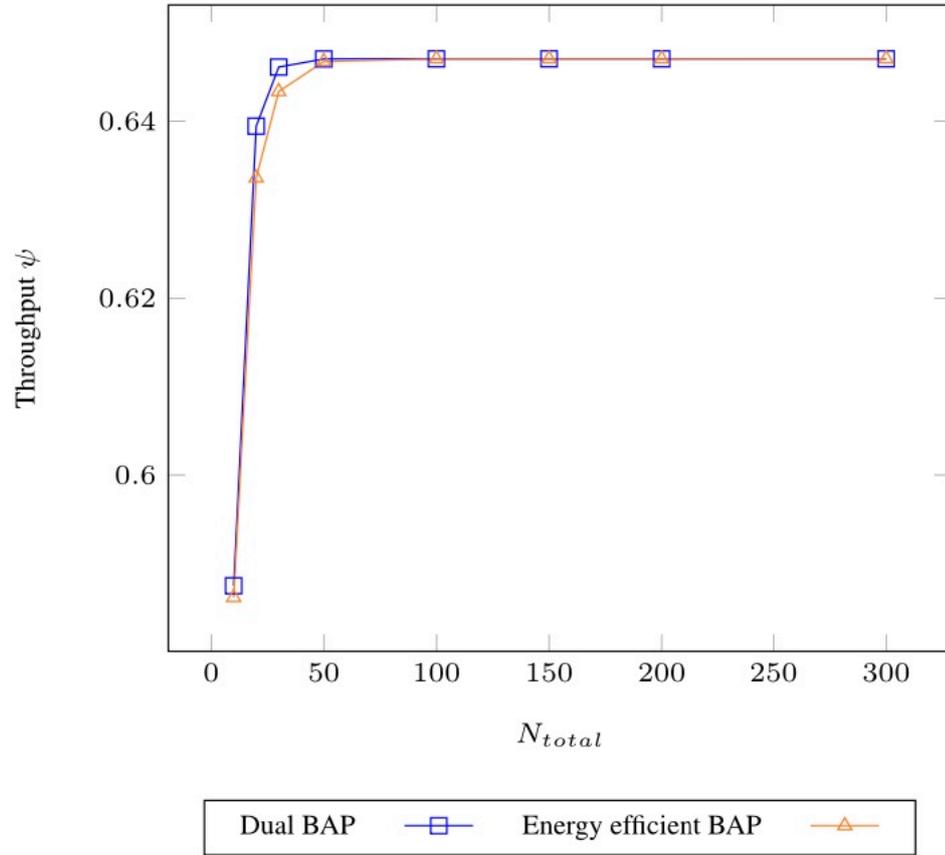


Fig.5  $N^{TOTALE}$  vs Throughput (Alaouchiche, Yasmine, et al.,2021)

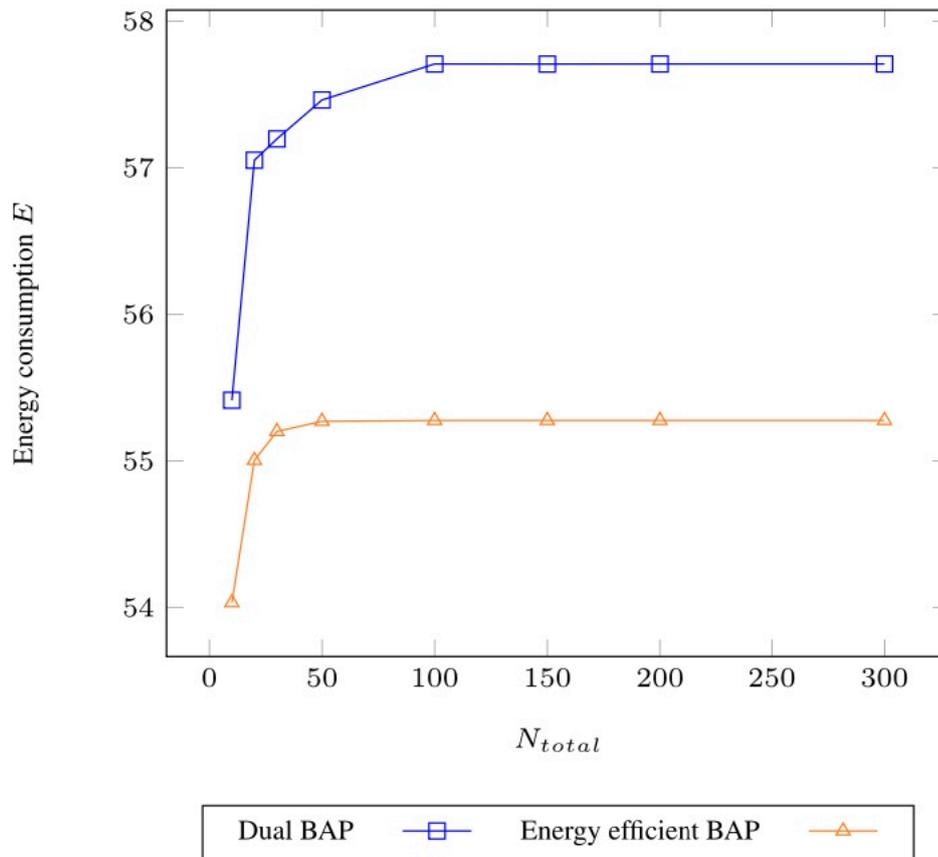


Fig.6  $N^{TOTALE}$  vs consumo energetico (Alaouchiche, Yasmine, et al.,2021)

Dai grafici forniti, emerge chiaramente come una lieve diminuzione del throughput nella linea produttiva possa tradursi in un notevole risparmio in termini di consumo energetico della linea stessa.

### 3. Variabilità nel contesto del Buffer Allocation Problem

Un'analisi più approfondita del Buffer Allocation Problem (BAP) ci conduce ad analizzare la variabilità, elemento di incertezza e fenomeno proprio ed inevitabile nei processi produttivi.

Durante la ricerca svolta per effettuare l'analisi descritta nei paragrafi precedenti, si è notato come la variabilità non viene considerata mai nella totalità della sua capacità ad influenzare una linea produttiva, pertanto, potrebbe portare a delle considerazioni per il calcolo dei buffer necessari sbagliate con un conseguente spreco di risorse; Questo capitolo, si pone come obiettivo quello di analizzare le molteplici sfaccettature della variabilità nel contesto del BAP, esaminando come influisce sulle performance del sistema produttivo, in modo da comprendere come considerarla durante la trattazione del BAP.

La presente analisi si articola attraverso l'esame di ulteriori articoli scientifici, categorizzati secondo il seguente approccio:

Inizialmente sono stati individuati articoli generali che affrontassero il tema delle linee produttive con l'obiettivo di comprendere quali fossero i parametri più utilizzati per descriverle e soprattutto i parametri che la variabilità va ad influenzare maggiormente. Successivamente, si è proceduto con una ricerca mirata, focalizzandosi sulla ricerca delle tipologie di variabilità in grado di influenzare il ciclo produttivo delineando la legge della variabilità. Tali ricerche hanno rilevato come il Work In Progress (WIP) possa rappresentare un argomento cruciale per la trattazione di questo capitolo,

di conseguenza è stata condotta una ricerca ulteriore al fine di individuare articoli che esplorassero la correlazione tra WIP e variabilità.

### **3.1 Parametri di misura delle prestazioni della linea**

Coerentemente con Romero-Silva, Rodrigo et al. (Romero-Silva, Rodrigo, et al., 2019), si definiscono alcuni dei parametri più utilizzati e presenti in letteratura per l'analisi delle prestazioni di una linea produttiva.

Come evidenziato in precedenza il throughput, da questo momento spesso indicato con TH come nell'articolo sopra-citato (Romero-Silva, Rodrigo, et al., 2019), è un parametro fondamentale per stabilire le prestazioni di una linea in quanto misura il numero di unità prodotte nell'unità di tempo.

Considerando la specificità dell'analisi centrata sulla variabilità risulta utile introdurre la varianza del throughput indicata come  $\text{Var}(\text{TH})$ .

Il successivo parametro di rilievo è il Flow Time (tempo di flusso) indicato come FT che rappresenta la durata complessiva del ciclo di produzione di un pezzo nella linea, si può quindi comprendere come esso sia fondamentale per definire l'efficienza di un sistema produttivo come evidenziato da Hillier, Frederick S. (Hillier, Frederick S., 2001).

Un terzo parametro preso in considerazione è l'inter-departure time (D), che misura il tempo trascorso tra la consegna di due pezzi finiti, usualmente viene utilizzata la media di questa misura indicata come  $\bar{D}$  nota come Takt time nell'ambito di Lean Production.

### **3.2 Legge della variabilità**

Come suggerito da Schmenner and Swink (Schmenner and Swink,1998) per la gestione operativa di una linea produttiva si richiede un'attenta indagine della *"legge della variabilità"* che la caratterizza in quanto essa ha un impatto notevole sulle prestazioni.

Schmenner and Swink dichiarano: *"maggiore è la variabilità casuale, richiesta al processo o inerente al processo stesso o agli elementi lavorati, tanto meno il processo sarà produttivo"* (Schmenner and Swink,1998).

Uno degli impatti più rilevanti della variabilità sulle prestazioni è rappresentato dalla variazione dell'inter-departure Time-Var(D) e dei tempi di processo nella linea, fenomeno studiato dalla teoria delle code.

Come analizzato da Romero-Silva,Rodrigo et al. (Romero-Silva, Rodrigo, et al., 2019) una maggiore variabilità dei suddetti tempi produce code più lunghe, con conseguenti tempi di attesa prolungati e quindi una bassa soddisfazione dei clienti.

#### 3.2.1 Influenza dei tempi di processo

Per analizzare l'influenza della variabilità dei tempi di processo viene preso in considerazione lo studio di Hillier e Boling (Hillier and Boling,1966) che per primi hanno dimostrato che una linea equilibrata e satura con tempi di processo variabili genera un TH inferiore rispetto a quello che si aspetterebbe da una linea deterministica, cioè una linea in cui tutte le stazioni hanno un tasso di produzione costante generando un prodotto ogni unità di tempo.

Il risultato di tale studio evidenzia che, anche in situazioni in cui la dimensione del buffer non costituisce un vincolo significativo, il TH viene influenzato negativamente dalla variabilità nei tempi di processo.

Questo sottolinea l'importanza critica di gestire e ridurre la variabilità nei processi produttivi anche in contesti in cui la presenza di buffer sembrerebbe poter mitigare gli effetti negativi della variabilità.

Un ulteriore studio sull'effetto della variabilità dei tempi di processo è effettuato da Taylor e Heragu (Taylor and Heragu, 1999) i quali dimostrano che un miglioramento del 100% della deviazione standard dei tempi di processo si traduce in un miglioramento delle prestazioni. Riportando i risultati in termini quantitativi:

- Nel caso di tempi di processo esponenziali, si osserva una significativa riduzione del tempo di processo medio del 83% in presenza di buffer infiniti e del 67% quando si considerano dimensioni di buffer finite;
- Nel caso di tempi di processo normali, si verifica una riduzione del tempo di processo medio del 22% in presenza di buffer infiniti e del 23% quando si considerano dimensioni di buffer finite;

### 3.2.2 Distribuzione dei tempi processo e dell'inter-departure Time

Le distribuzioni dell'inter-departure Time e dei tempi di processo costituiscono fattori determinanti sul tempo medio di attesa.

Secondo l'analisi di Romero-Silva, Rodrigo et al. (Romero-Silva, Rodrigo, et al., 2019), una maggiore asimmetria nell'inter-departure Time porta ad un minore tempo medio di attesa in code singole insature.

L'analisi dell'influenza della distribuzione dei tempi di processo è stata invece approfondita da Atkinson, J. Ben. (Atkinson, J. Ben., 2000), in cui si dimostra che l'influenza dipende dal coefficiente di variazione dell'inter-departure-time indicato come  $SCV_A$  nell'articolo citato. Se il coefficiente  $SCV_A > 1$ , il tempo medio di attesa diminuisce all'aumentare dell'asimmetria del tempo di processo, contrariamente, se  $SCV_A < 1$ , il tempo medio di attesa aumenta con l'aumentare dell'asimmetria del tempo di processo.

### **3.2 relazioni tra variabilità e parametri di progetto**

In questo capitolo si esplora la connessione esistente tra parametri progettuali e variabilità, concentrandosi su:

- dimensione dei buffer;
- lunghezza delle linee produttive
- variabilità dell'allocazione lungo il flusso produttivo.

Si cercherà, analizzando la letteratura, di comprendere come le scelte progettuali incidano sulla gestione della variabilità all'interno della linea produttiva.

#### 3.2.1 Dimensione dei buffer e lunghezza della linea

La dimensione dei buffer e la lunghezza della linea sono due parametri differenti strettamente connessi tra loro e pertanto vengono spesso studiati insieme.

Già nei primi studi riguardanti il Buffer Allocation Problem (BAP) si era a conoscenza di tale correlazione come evidenziato nell'articolo di Burke, Paul J. (Burke, Paul J.,1956), il quale, nel 1956, dimostrò che linee più lunghe e buffer di dimensioni ridotte comportano una riduzione del Throughput.

Questo fenomeno può essere spiegato dal fatto che linee più lunghe e buffer più piccoli generano sia ad un maggior numero di stazioni "bloccate" che delle stazioni "affamate".

Una stazione viene detta "bloccata" quando non può procedere con la produzione a causa di una mancanza di input causata dalla stazione precedente.

Al contrario viene detta “affamata” quando nonostante abbia terminato il suo lavoro e potrebbe iniziare una nuova lavorazione la stazione successiva non è pronta a ricevere.

He, et al. (He, et al., 2007) nel loro studio hanno dimostrato che l’incremento della lunghezza della linea porta sia ad una diminuzione della  $Var(TH)$  che ad un aumento di  $Var(FT)$ .

Nello stesso studio si evidenzia, in conformità ad altri autori in letteratura, che ad un aumento della dimensione dei buffer è associato un aumento di  $Var(TH)$ .

Un risultato simile viene ottenuto dallo studio di Kalir e Sarin (KALIR, Adar A.; SARIN, Subhash C.,2009) i quali provano che una linea più lunga porta ad un TH inferiore e un aumento di  $Var(D)$  mentre un incremento della dimensione dei buffer aumenta il TH e diminuisce  $Var(D)$ .

### 3.2.2 Variabilità dell’allocazione lungo il flusso produttivo.

Per analizzare l’allocazione delle stazioni in una linea produttiva, lo studio di Mcnamara, Tom, et al. (Mcnamara, Tom, et al.,2016) analizza attentamente il concetto di “bowl effect”.

Un risultato di rilievo emerso da questa ricerca è la raccomandazione di distribuire le stazioni in modo specifico: posizionando quelle più veloci al centro della linea, mentre le più lente e i potenziali colli di bottiglia all’inizio e alla fine della linea produttiva. Tale disposizione è progettata per massimizzare il Throughput medio complessivo.

Un'ulteriore analisi sulla distribuzione ottimale delle stazioni è stata condotta da Suresh e Whitt (Suresh and Whitt,1990).

La loro analisi si basa sulla variabilità dei tempi di processo, suggerendo di collocare la stazione con il tasso di variabilità più basso all'inizio della linea e la stazione con il tasso più alto alla fine.

Tuttavia, è fondamentale sottolineare che questa disposizione non è universalmente ottimale per ogni configurazione, evidenziando la complessità di tale problema.

Dall'analisi di questi studi emerge la necessità di un approccio specifico e mirato nello studio di una linea produttiva, in modo da poter gestire al meglio le variabilità che la caratterizzano.

### **3.3 Quantificare l'impatto della variabilità sulle prestazioni di una linea**

Per quantificare ed identificare l'impatto che la variabilità ha sulle prestazioni di una linea si analizza lo studio di Delp, et al. (Delp, et al., 2006) nel quale viene introdotto il "*fattore X*" calcolato come il rapporto tra il flow-time medio complessivo e la somma dei tempi di processo di tutte le attività nella linea.

È chiaro quindi come il "*fattore X*" fornisca una misura utile a valutare quanto tempo ciascuna parte del processo rimanga sulla linea senza apportare valore aggiunto.

Si può considerare il "*fattore X*" come uno strumento fondamentale per valutare l'efficienza del flusso di produzione, evidenziando i tempi morti derivanti dalla variabilità dei tempi di processo.

Un'ulteriore valutazione della variabilità in una linea può essere effettuata attraverso l'effetto "bullwhip" derivante dalle dinamiche del Supply Chain Management (Isaksson, et al., 2016).

Applicando questo concetto nelle linee di produzione è possibile calcolare il rapporto tra la varianza della domanda degli ordini a monte e la varianza della domanda soddisfatta dalle scorte a valle (Romero-Silva, Rodrigo, et al., 2019).

Tale rapporto fornisce una chiara prospettiva di come la variabilità cambi lungo tutto il processo di produzione.

Gli approcci proposti possono essere utili per valutare accuratamente l'impatto della variabilità, fornendo così uno strumento utile per l'ottimizzazione della linea analizzata.

### **3.4 Relazione tra variabilità e WIP**

Prima di studiare il legame tra variabilità e WIP è necessario fornirne una definizione dettagliata in modo da comprendere il perché della sua fondamentale importanza.

#### 3.4.1 Definizione WIP

WIP è l'acronimo di Work In Process, con esso "si indica il numero di pezzi o lotti che vengono lavorati contemporaneamente all'interno del sistema produttivo" (Wikipedia).

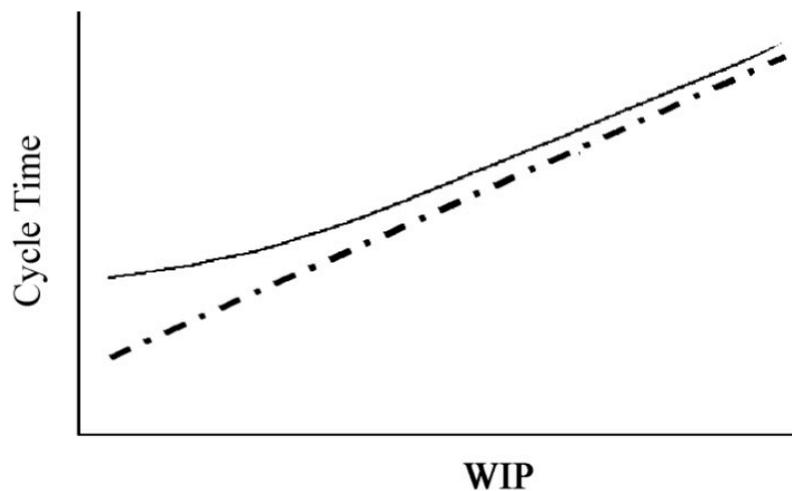
Con WIP si intende quindi il numero di unità di produzione che hanno avviato il processo produttivo ma che ancora non lo hanno completato.

Si comprende come un controllo del WIP risulta cruciale per comprendere l'entità del lavoro attualmente in fase di realizzazione e gestire l'efficienza complessiva del sistema produttivo.

#### 3.4.2 Come il WIP influenza la variabilità

Il WIP, come definito precedentemente, è strettamente collegato alle dinamiche temporali della linea di produzione.

Un incremento del WIP porta sicuramente ad un prolungamento del FT (Flow-Time) per tutti gli ordini in arrivo e come dimostrato da Kan Wu (Kan Wu, 2005) (Fig.7) ad un Cycle-Time (tempo totale richiesto per portare a termine un'unità di produzione) maggiore.



*Fig.7 Relazione tra WIP e Cycle-Time (Kan Wu, 2005)*

Riducendo quindi il WIP si avrà una minore variabilità nell'intera linea di produzione collegata ad una diminuzione del Cycle-Time e del Flow-Time con un conseguente miglioramento delle prestazioni del sistema produttivo nel suo complesso.

Usualmente, nei sistemi di produttivi, per ridurre il WIP vengono impiegate due strategie: stabilire un ritmo di produzione predeterminato e/o fissare un limite sul WIP massimo del sistema.

Come suggerito da Romero-Silva, Rodrigo et al. (Romero-Silva, Rodrigo, et al., 2019) le metodologie più adottate per attuare tali strategie sono: il Kanban, il CONWIP e il DBR (Drum-Buffer-Rope). Queste metodologie limitano la capacità dei buffer in modo da mantenere i valori di WIP bassi a sufficienza prestando attenzione a non ridurre eccessivamente il livello di sicurezza.

La letteratura fornisce diversi confronti tra tali strategie come, ad esempio, lo studio condotto da Jodlbauer e Huber (Jodlbauer and Huber, 2008).

Dai risultati analizzati, emerge che la metodologia CONWIP è quella che presenta le migliori prestazioni.

Anche in fonti più generali e non specificatamente di settore come Wikipedia viene riportato questo dato, riferendo che: *“Tra le tecniche di controllo del flusso di materiale, il CONWIP si rivela una delle più efficaci per mantenere il livello di WIP più basso possibile”*.

Tuttavia, è importante notare che questa metodologia è sensibile alla corretta selezione del parametro relativo alla capacità totale dei buffer.

## 4. Lacune presenti in letteratura

Da un'analisi critica di una serie di studi presenti nella letteratura che trattano il Buffer Allocation Problem e come la variabilità impatta su tale problema, affiora la possibilità di ampliare ulteriormente la letteratura specifica.

Il presente capitolo, basandosi sugli studi analizzati e presenti nella bibliografia, è orientato a illustrare le lacune presenti nella letteratura odierna.

La prima lacuna riscontrata, suggerita dalla totalità degli articoli esaminati come possibile sviluppo dei propri studi, risulta la mancanza di studi concentrati sull'applicazione di metodologie multi-obiettivo in modo da costruire nuovi approcci per la gestione della variabilità o, con la giusta precauzione, collegare gli algoritmi con l'intelligenza artificiale, un campo attualmente in notevole espansione e successo.

Un'ulteriore lacuna presente nella letteratura contemporanea è rappresentata dalla mancanza di analisi dell'impatto ambientale delle strategie adottate per la gestione del BAP, nonché dalla scarsa esplorazione del collegamento tra variabilità ed efficienza energetica come evidenziato dal lavoro di Alaouchiche, Yasmine, et al. (Alaouchiche, Yasmine, et al., 2021), questo studio fornisce una prospettiva sul settore sempre più orientata verso la sostenibilità, evidenziando la necessità di approfondire ulteriormente questa trattazione.

Lo studio di Alaouchiche, Yasmine, et al. (Alaouchiche, Yasmine, et al., 2021) può fungere da punto di partenza per esplorare questa direzione, poiché

nonostante le numerose ricerche effettuate per la scrittura di questa tesi sulle piattaforme opportune, al fine di effettuare dei confronti con il suddetto articolo, è emersa una presenza limitata di studi che affrontino la tematica in questione in modo approfondito.

.

## 5. Conclusioni

L'analisi della letteratura condotta nel presente elaborato ha evidenziato come nella gestione della produzione, la trattazione del BAP con le sue differenti formulazioni e specificamente la gestione della variabilità, siano tematiche di fondamentale importanza per raggiungere l'obiettivo di ottenere un sistema produttivo performante e con la maggiore efficienza possibile.

Durante la trattazione del BAP si è potuto notare come in relazione agli obiettivi che si prefissano per il caso specifico i risultati che si ottengono sono differenti, ad esempio tra BAP1 e BAP2 si è notato che la seconda soluzione porta ad un valore di throughput minore rispetto al massimo cercato con il BAP1 ma ciò viene collegato ad un  $N^{TOTALE}$  inferiore portando quindi a diversi benefici. Ancora, un approccio focalizzato sulle attuali problematiche ecologiche mondiali può generare un throughput minore ma con il conseguimento di un notevole risparmio in termini di energia.

Trattando inoltre la tematica della variabilità si è notato come le sue diverse tipologie influenzino la gestione della produzione.

Si è rilevato come un controllo e una riduzione dei tempi di processo portano ad una variabilità complessiva minore conducendo quindi a migliori prestazioni.

In seguito, si è analizzato come la variabilità della lunghezza della linea, delle dimensioni dei buffer e dell'allocazione delle postazioni di lavoro influiscano sul raggiungimento di una linea più efficiente evidenziando che, anche in questo caso, in presenza di caratteristiche sempre vantaggiose risulta

comunque opportuno uno studio specifico per ogni struttura produttiva al fine di ottimizzarne il risultato.

Infine con la trattazione della relazione tra WIP e variabilità si è dimostrato come una riduzione del WIP porta sempre a dei benefici, poiché fa diminuire le variabilità delle tempistiche caratterizzanti la linea. Per ottenere la suddetta riduzione, sono proposte tre diverse tipologie di sistemi di gestione della produzione: Kanban, CONWIP, DBR. Tali metodologie si focalizzano sulla minimizzazione del WIP o sulla sua costanza durante l'attività della linea, si è analizzato che il sistema CONWIP risulta il più efficiente ma, essendo fortemente influenzato dalla selezione corretta di alcuni parametri, potrebbe indurre a delle valutazioni errate.

Per concludere il presente elaborato sono stati indicati alcuni possibili orientamenti di ricerca, basati sull'esistenza di importanti lacune presenti in letteratura.

## BIBLIOGRAFIA

- GERSHWIN, Stanley B.; SCHOR, James E. Efficient algorithms for buffer space allocation. *Annals of Operations research*, 2000, 93.1-4: 117-144.
- CHAN, F. T. S.; NG, E. Y. H. Comparative evaluations of buffer allocation strategies in a serial production line. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2002, 19: 789-800.
- CHOW, We-Min. Buffer capacity analysis for sequential production lines with variable process times. *International Journal of Production Research*, 1987, 25.8: 1183-1196.
- LIU, C.-M.; LIN, C.-L. Performance evaluation of unbalanced serial production lines. *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 1994, 32.12: 2897-2914.
- SABUNCUOGLU, I.; EREL, E.; GOCGUN, Yasin. Analysis of serial production lines: characterisation study and a new heuristic procedure for optimal buffer allocation. *International Journal of Production Research*, 2006, 44.13: 2499-2523.
- YAMASHITA, Hideaki; ALTIOK, Tayfur. Buffer capacity allocation for a desired throughput in production lines. *IIE transactions*, 1998, 30.10: 883-892
- CHEHADE, Hicham, et al. Buffers sizing in assembly lines using a Lorenz multiobjective ant colony optimization algorithm. In: *2010 International Conference on Machine and Web Intelligence*. IEEE, 2010. p. 283-287.

- [https://it.wikipedia.org/wiki/Algoritmo\\_delle\\_colonie\\_di\\_formiche#:~:text=Gli%20algoritmi%20delle%20colonie%20di,una%20parte%20dell%27ottimizzazione%20metaeuristica.](https://it.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_delle_colonie_di_formiche#:~:text=Gli%20algoritmi%20delle%20colonie%20di,una%20parte%20dell%27ottimizzazione%20metaeuristica.)
- ALAOUCHICHE, Yasmine; OUAZENE, Yassine; YALAOUI, Farouk. Energy-efficient buffer allocation problem in unreliable production lines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 114: 2871-2885.
- OUAZENE, Yassine, et al. Equivalent machine method for approximate evaluation of buffered unreliable production lines. In: *2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Production and Logistics Systems (CIPLS)*. IEEE, 2013. p. 33-39.
- ROMERO-SILVA, Rodrigo, et al. Serial production line performance under random variation: dealing with the 'Law of Variability'. *Journal of Manufacturing Systems*, 2019, 50: 278-289.
- HILLIER, Frederick S. *Introduction to operations research*. McGrawHill, 2001.
- SCHMENNER, Roger W.; SWINK, Morgan L. On theory in operations management. *Journal of operations management*, 1998, 17.1: 97-113.
- HILLIER, Frederick S. The effects of some design factors on the efficiency of production lines with variable operation times. *Journal of Industrial Engineering*, 1966, 17.12: 651-658.
- TAYLOR, G. D.; HERAGU, S. S. A comparison of mean reduction versus variance reduction in processing times in flow shops. *International journal of production research*, 1999, 37.9: 1919-1934.

- ATKINSON, J. Ben. Some related paradoxes of queuing theory: new cases and a unifying explanation. *Journal of the Operational Research Society*, 2000, 51: 921-935.
- BURKE, Paul J. The output of a queuing system. *Operations research*, 1956, 4.6: 699-704.
- HE, Xin-Feng; WU, Su; LI, Quan-Lin. Production variability of production lines. *International Journal of Production Economics*, 2007, 107.1: 78-87.
- KALIR, Adar A.; SARIN, Subhash C. A method for reducing inter-departure time variability in serial production lines. *International Journal of Production Economics*, 2009, 120.2: 340-347.
- MCNAMARA, Tom; SHAABAN, Sabry; HUDSON, Sarah. Fifty years of the bowl phenomenon. *Journal of Manufacturing Systems*, 2016, 41: 1-7.
- SURESH, S.; WHITT, Ward. Arranging queues in series: A simulation experiment. *Management Science*, 1990, 36.9: 1080-1091.
- DELP, Deana; SI, Jennie; FOWLER, John W. The development of the complete X-factor contribution measurement for improving cycle time and cycle time variability. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2006, 19.3: 352-362.
- ISAKSSON, Olov HD; SEIFERT, Ralf W. Quantifying the bullwhip effect using two-echelon data: A cross-industry empirical investigation. *International Journal of Production Economics*, 2016, 171: 311-320.
- [https://it.wikipedia.org/wiki/Work\\_in\\_process#:~:text=L%27acronimo%20WIP%2C%20che%20sta,interno%20di%20un%20sistema%20produttivo](https://it.wikipedia.org/wiki/Work_in_process#:~:text=L%27acronimo%20WIP%2C%20che%20sta,interno%20di%20un%20sistema%20produttivo).

- WU, Kan. An examination of variability and its basic properties for a factory. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2005, 18.1: 214-221.
- JODLBAUER, Herbert; HUBER, A. Service-level performance of MRP, kanban, CONWIP and DBR due to parameter stability and environmental robustness. *International Journal of Production Research*, 2008, 46.8: 2179-2195.
-