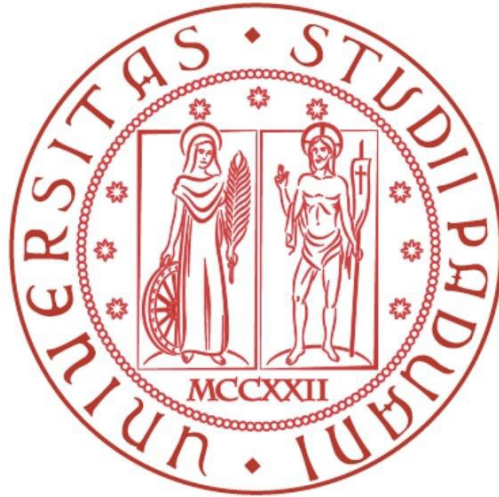


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di laurea in Ingegneria Meccatronica



Definizione della capacità ottimale di buffer di impianti
automatizzati attraverso la simulazione

Laureando: Bortolotto Gianluca

Matricola: 2006957

Relatore: Prof. Zennaro Ilenia

Anno Accademico 2023-2024

Sommario

Lo scopo di questo elaborato è di fornire una panoramica generale sul problema del dimensionamento ottimale dei buffer interoperazionali delle linee asincrone automatizzate (“BAP”, Buffer Allocation Problem). Infatti tale tema è estremamente attuale e critico nella maggior parte delle aziende di produzione che adottano impianti con layout per prodotto.

Un impianto automatizzato è un sistema di produzione, di assemblaggio o di confezionamento progettato per eseguire operazioni e/o processi in modo automatico, senza o con una minima interferenza umana. Questi impianti sono spesso utilizzati in una vasta gamma di settori industriali per migliorare l'efficienza, ridurre gli errori umani (quindi migliorare la qualità dei prodotti finiti) e aumentare la produttività. Gli impianti automatizzati possono essere controllati da computer o dispositivi programmabili e sono in grado di eseguire compiti ripetitivi in modo preciso e costante.

Tale elaborato si focalizzerà sulle linee di produzione automatizzate, ossia un insieme sequenziale di macchine, attrezzature e operazioni che lavorano insieme per produrre un prodotto o completare un processo specifico. Questo tipo di organizzazione è comunemente utilizzato nell'ambito della produzione industriale e manifatturiera o la produzione di beni di consumo. Tali linee, essendo l'insieme di più macchine distinte che lavorano a velocità differenti e con diverse caratteristiche di micro-fermate, sono intervallate da buffer interoperazionali, che hanno lo scopo di rendere la produzione continua, evitando che la linea si fermi. Infatti grazie a questi spazi di accumulo, se un macchinario si ferma, per un tempo limitato, la macchina a monte può continuare a produrre depositando i pezzi nel buffer mentre la macchina a valle può continuare a produrre lavorando i pezzi che sono ancora presenti in esso. Questi due fenomeni sono chiamati blocking e starving, caratteristici degli impianti automatizzati, ed i buffer, in qualità di spazi di accumulo, hanno l'obiettivo di diminuirli. Costituiscono tuttavia anche un costo in termini di investimento, manutenzione e spazio utilizzato.

Per la risoluzione del BAP esistono diversi metodi, a seconda dell'obiettivo che viene posto. Solitamente gli obiettivi possono essere ricondotti a due fondamentali, ovvero la massimizzazione della produzione e la minimizzazione del tempo di attraversamento. Esistono metodi “empirici” per il calcolo diretto della dimensione ottimale, metodi di programmazione lineare intera ed algoritmi iterativi. Solitamente sono tutti accompagnati da

un'analisi delle prestazioni che ha l'obiettivo di validare il risultato ottenuto. Tra gli strumenti più noti di validazione c'è la simulazione ad eventi discreti.

In tale elaborato, verranno dapprima introdotte le principali tipologie di produzione, con particolare focus sulle linee di produzione ed i buffer. Successivamente verranno presentati i principali metodi per la risoluzione dei BAP. Infine verrà proposta un'applicazione tramite simulazione di risoluzione di BAP.

INDICE

Sommario	3
Indice delle Figure.....	6
1. Introduzione	7
1.1 Classificazione tipologie di Produzione	7
Zona I-Layout per Prodotto	8
Zona II-Layout per Processo	9
Zona III-Layout Misto	11
Zona IV-Layout a postazione fissa	14
1.2 Dimensionamento Zona I	15
2. La Teoria Affidabilistica.....	19
2.1 Affidabilità e Inaffidabilità dei componenti	19
2.2 Stima delle funzioni affidabilistiche dai dati sul campo	24
3. Il B.A.P.	27
3.1 Metodi Basati sulla Valutazione delle Performance	27
3.2 Metodi basati su soluzione esplicite	33
3.3 Metodi di ottimizzazione integrata.....	35
3.4 Metodi di ottimizzazione iterativa	36
4. Applicazione	39
4.1 Input Data.....	39
4.2 Analisi dei dati	41
4.3 Simulazione	43
4.3 Discussione	53
5. Conclusioni	57
BIBLIOGRAFIA.....	59
BIBLIOGRAFIA DELLE FIGURE	60

Indice delle Figure

Figura 1: Diagramma PQ.....	7
Figura 2: schema linea sincrona	8
Figura 3: schema linea a-sincrona..	8
Figura 4: schema layout per processo.....	10
Figura 5: esempio di cella	11
Figura 6: schema FMS	13
Figura 7: esempio zona IV, cantiere aeronautico	14
Figura 8 Up-time e Down-time macchinari	15
Figura 9: andamento dei costi in funzione della dimensione di un buffer.....	18
Figura 10: distribuzione gaussiana del rateo di guasto incondizionato	20
Figura 11: curva a vasca da bagno	21
Figura 12: cicli di vita componenti riparabili	23
Figura 13: esempio risultato <i>DM, IDM, MRM</i>	24
Figura 14: Matrice delle probabilità di transizione	28
Figura 15: sottolinea considerata	29
Figura 16: schema metodo decomposizione e aggregazione.....	29
Figura 17: schema sistema con fenomeni di accodamento.....	30
Figura 18: $\Delta max +$ e $\Delta max -$	34
Figura 19: andamento del buffer	34
Figura 20: schema metodi iterativi.....	36
Figura 21: Simulazione di etichettatrice e confezionatrice	39
Figura 22: distribuzione TBF Etichettatrice	41
Figura 23: Distribuzione TTR etichettatrice.....	42
Figura 24: Distribuzione TBF Confezionatrice	42
Figura 25: Distribuzione TTR Confezionatrice	43
Figura 26: Source FlexSim®	44
Figura 27: Dati input Source.....	44
Figura 28: Processor FlexSim®.....	45
Figura 29: Dati input etichettatrice	45
Figura 30: Queue FlexSim®	46
Figura 31: Dati input Buffer.....	46
Figura 32: Sink FlexSim®	47
Figura 33: Distribuzioni di TBF e TTR per l'Etichettatrice	47
Figura 34: andamento del buffer nelle varie configurazioni.....	49
Figura 35 Throughput al variare della dimensione del buffer	50
Figura 36: coefficienti di utilizzo macchinari al variare delle dimensioni del buffer	51
Figura 37: andamento dell'output della linea in una giornata lavorativa	53
Figura 38: andamento percentuale della media degli utilizzi dei macchinari	54

1. Introduzione

In questo primo capitolo verrà fatto un quadro generale sulle tipologie di produzione di un sistema di produzione per poi concentrarsi sulla progettazione degli impianti dedicati alla prima tra queste tipologie, ossia le linee di produzione automatizzate che consentono di rispondere alla domanda di mercato con elevati volumi prodotti in poco tempo (nell'industria odierna, rispondere prontamente alle esigenze del mercato è fondamentale per il successo aziendale.), diminuendo la varietà di prodotti

1.1 Classificazione tipologie di Produzione

Esistono diverse tipologie di impianto industriale, da quelli più automatizzati fino alla produzione artigianale. Gli impianti possono essere classificati in base alla tipologia di produzione, al modo di produrre i volumi e a come rispondono al mercato. Uno strumento molto diffuso per la classificazione degli impianti è il diagramma P-Q che mostra l'andamento del volume produttivo in funzione della varietà dei prodotti, come mostrato in figura 1. Tale diagramma è stato ottenuto studiando le varie realtà aziendali presenti negli ultimi anni, osservando il rapporto tra volume produttivo e varietà dei prodotti finiti.

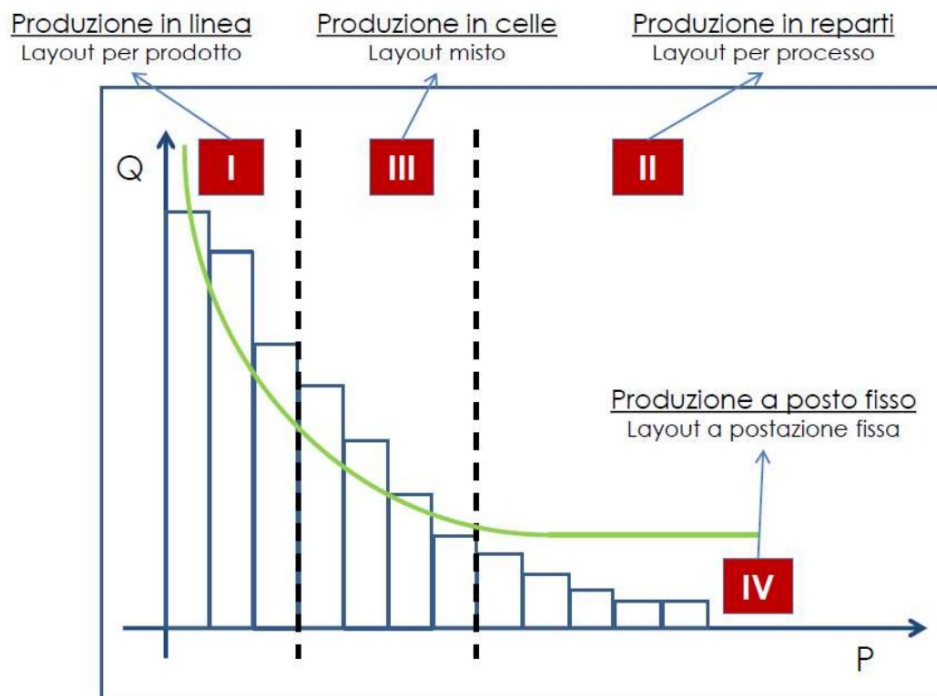


Figura 1: Diagramma PQ

Dai risultati di questa analisi, e quindi dal diagramma rappresentato, si deduce immediatamente che al crescere della varietà di prodotti finiti generati da un'azienda, i volumi produttivi diminuiscono. Al contrario, al diminuire della varietà, crescono i volumi.

Si possono a questo punto distinguere, 4 zone, come riportato in Figura 1:

- ZONA I – Layout per Prodotto
- ZONA II – Layout per Processo
- ZONA III – Layout Misto
- ZONA IV – Layout a postazione fissa

Zona I-Layout per Prodotto

In questa zona si hanno elevati volumi produttivi e una bassa varietà di prodotti. I macchinari sono disposti con layout “in linea” (o “per prodotto”), ossia tale per cui i macchinari che la compongono sono disposti secondo una linea e concorrono tutti alla lavorazione di un prodotto, come rappresentato nelle figure 2 e 3.

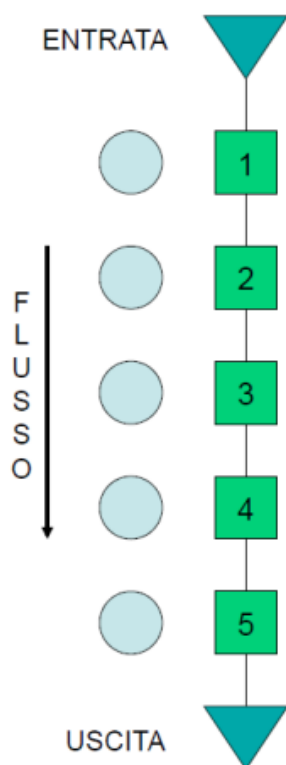


Figura 2: schema linea sincrona

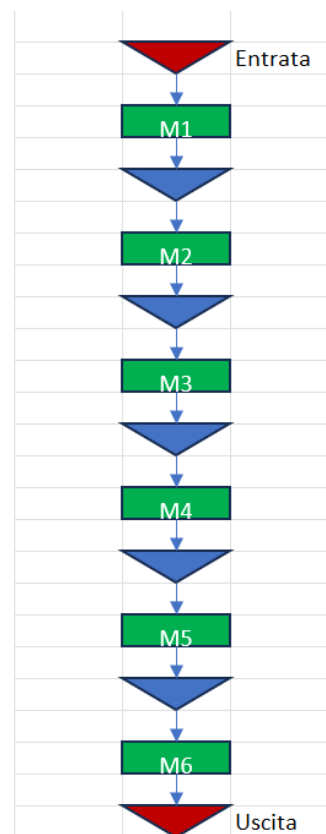


Figura 3: schema linea a-sincrona

Veniamo allora alle *caratteristiche* delle linee produttive della ZONA I:

- La produzione è continua: si produce sempre lo stesso prodotto finito

- Layout trasparente: si può distinguere ad occhio nudo il ciclo tecnologico che il prodotto deve eseguire
- Si hanno basse movimentazioni: i macchinari sono disposti vicini tra loro e il materiale passa velocemente da uno stadio all'altro
- Si hanno bassi Work In Progress (W.I.P.): i semilavorati non rimangono molto in attesa prima di passare alla stazione successiva
- Si hanno percorsi unidirezionali e lineari: i materiali si muovono in un unico senso sempre da un macchinario a monte verso il successivo a valle
- I trasporti sono fissi e automatizzati: essendo i trasporti unidirezionali, i nastri trasportatori che muovono i materiali da uno stadio all'altro sono rigidi ed automatizzati
- Lo spazio è ben sfruttato: infatti non essendo necessari spazi per i WIP e per i trasporti flessibili (come i corridoi), la maggior parte dello spazio è occupato da macchinari e quindi da attività che portano valore aggiunto
- I macchinari sono molto specializzati per la lavorazione che devono compiere
- La manodopera è generica: non sono necessari operatori che svolgano compiti precisi atti alla produzione e lavorazione del materiale, bensì è sufficiente si occupino di semplici attività, come la supervisione delle macchine, volti al corretto funzionamento dell'impianto
- Coefficienti di utilizzo elevati (80,90%)

Zona II-Layout per Processo

Nella seconda zona vi è un'elevata varietà di prodotti ma bassi volumi produttivi. Le stazioni sono disposte con layout "a reparti" o "per processo" in quanto, a differenza della zona precedente, sono raggruppate in un reparto dedicato a seconda del processo che compiono sulla svariata tipologia di pezzi che possono lavorare, come in figura 4.

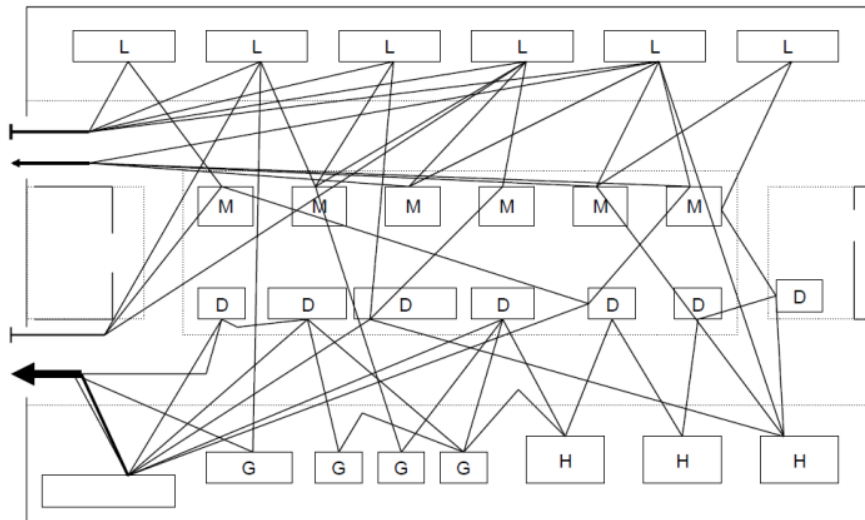


Figura 4: schema layout per processo

Le sue principali *caratteristiche* sono:

- Si ha una produzione tipicamente intermittente a lotti (AAAA, BBBB, CCCC, eccetera)
- Un layout non trasparente: sono visibili esclusivamente i processi svolti nei reparti, non è dunque possibile riconoscere ad occhio l'intero ciclo tecnologico che segue un certo prodotto
- Si hanno alte movimentazioni: ogni prodotto può attraversare tutti i reparti con un ordine e dei tempi sempre diversi a seconda del ciclo produttivo.
- Si hanno percorsi multidirezionali: i percorsi non sono univoci, in quanto la sequenza dei reparti dipende dal ciclo produttivo
- Si utilizzano trasporti flessibili: come conseguenza del punto precedente, non avendo dei percorsi prestabiliti, deve essere possibile muoversi da un reparto all'altro con una certa flessibilità, è quindi necessario avere dei trasporti flessibili e dei corridoi per gli spostamenti
- Sono presenti macchinari generici: essi devono infatti lavorare pezzi con caratteristiche diverse e non possono dunque essere specifici per un unico prodotto
- La manodopera è specializzata: per essere in grado di usare in modi diversi i macchinari generici al fine di lavorare prodotti diversi, è necessario un operatore in grado di svolgere in maniera specializzata una ben determinata mansione
- Lo spazio non è ben sfruttato: tra i vari reparti vi è bisogno di una certa quantità di spazio, per esempio per il transito delle apparecchiature per il trasporto dei lotti

(muletto) ed anche all'interno dello stesso reparto è necessaria una spaziatura tra una macchina e l'altra per depositare i diversi tipi di prodotto che dovranno essere lavorati; in entrambi i casi non viene prodotto valore aggiunto

- Si hanno elevati W.I.P., ovvero i prodotti prima di passare da un reparto all'altro spesso rimangono in attesa che il lotto sia completato e che il reparto successivo sia disponibile
- Coefficienti di utilizzo del singolo reparto bassi (circa 40%)

Zona III-Layout Misto

In caso di volumi e varietà intermedie si parla di “micro-linee” o “celle di produzione”, ovvero di layout intermedi tra zona I e zona II.

La produzione tipica di questa zona è la produzione per famiglia di prodotto in quanto nella stessa cella vengono lavorati prodotti diversi ma con caratteristiche comuni, che formano dunque una “famiglia”. Nella cella sono inseriti tutti i macchinari necessari alla loro lavorazione senza quindi il bisogno di spostarsi ad un altro reparto (figura 5).



Figura 5: esempio di cella

Per raggruppare prodotti diversi nello stesso sistema produttivo si utilizzano svariati *Criteri di Omogeneità* basati principalmente sull'omogeneità dal punto di vista di materiali, fasi produttive (tecnologie di lavorazione e sequenze produttive) e tempi produttivi (due diversi prodotti lavorati nella stessa cella non possono avere tempi di lavorazione estremamente differenti, in quanto i macchinari lavorerebbero ad ondate di carico).

In particolare per progettare una cella di produzione sono fondamentali 3 step:

- 1) Razionalizzazione del prodotto: ricerca di prodotti che a livello di disegno tecnico presentano delle somiglianze (attività svolta dall'uomo e quindi onerosa dal punto di vista del tempo utilizzato per svolgere tale compito)
- 2) Razionalizzazione del ciclo tecnologico: ricerca di prodotti che abbiano la stessa sequenza di lavorazioni o parte di essa; in realtà potrebbero differire sia in termini di ordine delle lavorazioni (motivo per cui il sistema di movimentazione del pezzo nelle celle deve essere estremamente flessibile) che per i tempi di lavorazione
- 3) Razionalizzazione del layout: è la ricerca della disposizione ottimale dei macchinari in celle di produzione (o anche in micro-linee se la sequenza e i tempi di produzione di ogni prodotto sono le medesime, con conseguente aumento nei volumi produttivi) ed è il passaggio più complicato in quanto compare un nuovo parametro da considerare, ossia la specificità dei macchinari (se, per esempio, prodotti di diverse famiglie necessitano di verniciatura, allora converrà porre una o più verniciatrici al di fuori dalle celle per cui passeranno tutti i pezzi, mentre se ciascuno di essi richiede anche un processo di tornitura, essendo un'operazione molto specifica per ogni prodotto, sarà meglio porre un torni per ogni cella)

I *vantaggi* di questa tipologia di produzione sono:

- Aumento della produttività mantenendo un'elevata flessibilità.
- Riduzione dei tempi di set-up: in una cella, terminata la produzione di un lotto di un certo prodotto, per passare a quella di un altro prodotto della famiglia il tempo di riconfigurazione del sistema è breve per via della "somiglianza" tra i due
- Riduzione dei W.I.P.: rispetto alla Zona II non ci sono più lotti che devono spostarsi da un reparto ad un altro e aspettare prima di poter essere lavorati
- Riduzione delle movimentazioni: rispetto alla Zona II non è più il rischio di dover percorrere grandi percorsi per passare al prossimo stadio di lavorazione
- Miglioramento nell'approvvigionamento dei materiali: l'ufficio acquisti, rispetto alla produzione per reparti, dovrà comprare meno tipologie di materia prima (o semilavorati) e in quantità maggiore il che consente di ottenere una scontistica maggiore dai fornitori
- Riduzione dei progetti da gestire dall'ufficio tecnico: avendo prodotti "simili", ci saranno meno progetti da gestire a carico dell'ufficio tecnico

Gli *svantaggi* invece sono i seguenti:

- Possibili sbilanciamenti: vi è il rischio di avere nello stesso stabilimento celle con volumi elevatissimi e celle con volumi modesti
- Tempi di implementazione molto lunghi: per completare la progettazione di una cella seguendo i 3 step sopra riportati, sono richiesti mesi se non addirittura anni

Un'ulteriore distinzione che potrebbe essere fatta in questi sistemi di produzione è quella tra cella manuale e cella automatizzata. Nel primo caso le operazioni al suo interno, che siano le lavorazioni stesse o le movimentazioni del pezzo, vengono svolte completamente dall'operatore umano con conseguente maggiore flessibilità dell'impianto, ma produttività ridotta. Nel secondo, in base al grado di automazione, parte (o tutte) di queste operazioni vengono svolte da un robot e sistemi di questo tipo sono i *Flexible Manufacturing Systems (FMS)* dei quali è riportato uno schema in figura 6

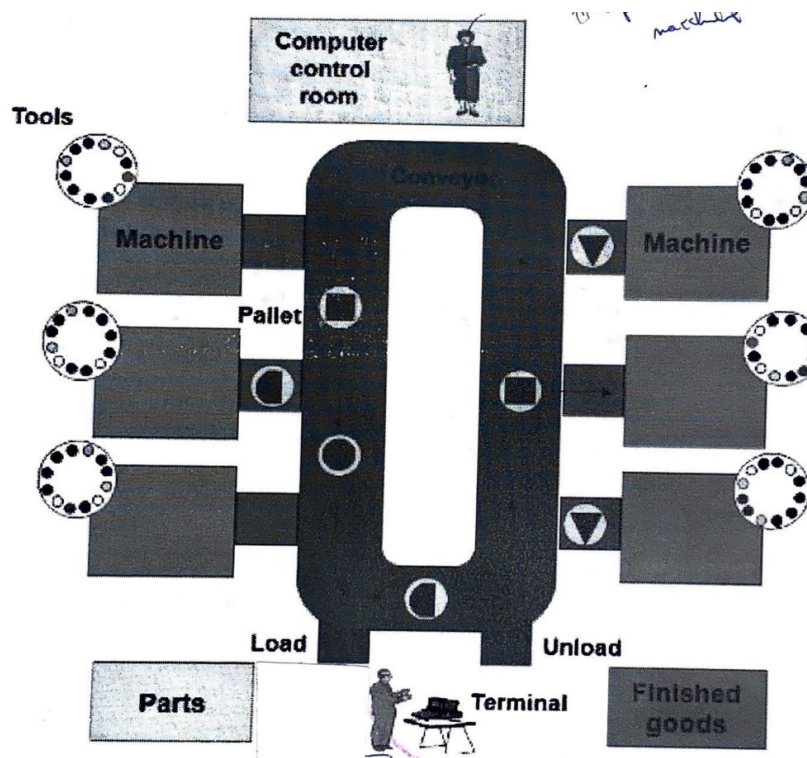


Figura 6: schema FMS

Tra i maggiori vantaggi rispetto alla cella manuale si hanno un aumento nei volumi produttivi, un miglioramento della qualità dei prodotti finiti, una riduzione del lead time (tempo che impiega il pezzo ad arrivare al cliente a seguito dell'ordine) e riduzione della manodopera impiegata. Come contro si hanno invece la necessità di investimenti elevati e il rischio dell'obsolescenza della tecnologia adottata

Zona IV-Layout a postazione fissa

Con riferimento alla figura 1 la Zona IV può essere scelta in due diversi punti:

- In prossimità dell'origine, dove ho varietà e volumi produttivi pressochè unitari (si pensi ad un cantiere aeronautico che costruisce un aereo considerando quest'ultimo come un elemento unico, figura 7)
- In basso a destra nel grafico, dove ho volumi unitari ed elevata varietà (si pensi allo stesso cantiere aeronautico ma considerando l'aereo come un insieme vastissimo di prodotti, figura 7)

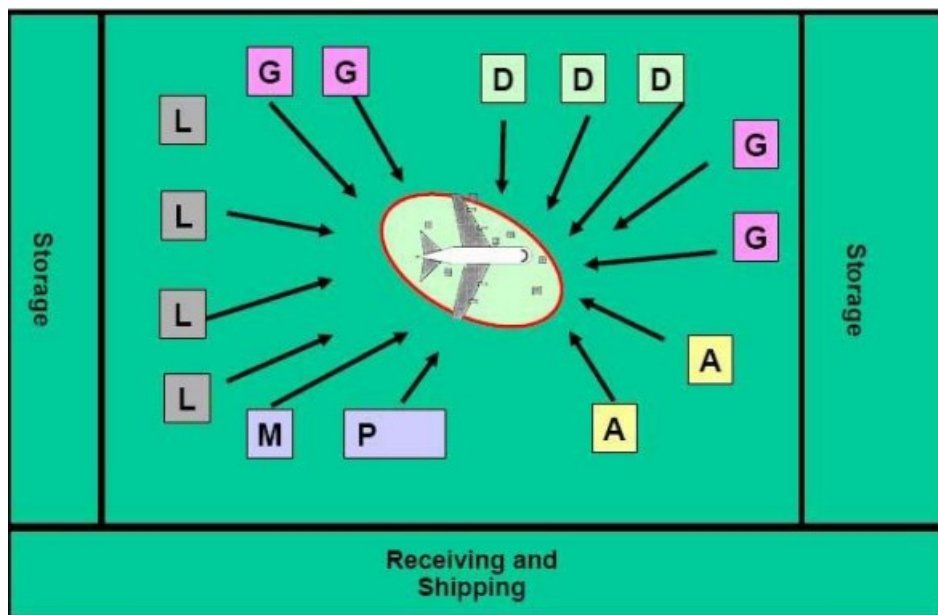


Figura 7: esempio zona IV, cantiere aeronautico

La produzione tipica di questa zona è unitaria, prevede ossia la fabbricazione di un pezzo unico. Per queste ragioni sono necessari attrezzature e macchinari flessibili.

Il layout, come preannunciato dal titolo, è a postazione fissa: il prodotto finito rimane “fermo” mentre operatore, attrezzature, materie prime e semi lavorati “girano” attorno ad esso (l'esempio del cantiere aeronautico in figura 7 è significativo da questo punto di vista) allo scopo di completarne la costruzione, a differenza delle tre precedenti zone in cui era il prodotto a spostarsi e le attrezzature rimanere stabili.

1.2 Dimensionamento Zona I

In questo elaborato ci si concentrerà nella prima zona, ovvero sulle linee di produzione automatizzate, con elevate moli di produzione e basse eterogeneità di prodotto.

Per dimensionare un impianto con layout per prodotto è necessario analizzarne le sue *inefficienze*. Tali inefficienze possono essere descritte da 4 coefficienti, ciascuno dei quali rappresenta una diversa fonte di inefficienza:

- K_1 , rendimento di scarto: ogni macchinario produce una certa percentuale di pezzi difettosi che devono essere scartati, questo si traduce in una riduzione del volume in uscita da tale stadio secondo la seguente relazione $Q_{uj} = Q_j \cdot k_1$ con Q_{uj} potenzialità d'uscita allo stadio j-esimo e Q_j potenzialità in ingresso allo stadio j-esimo
- K_2 , coefficiente di disponibilità: indica per quanto tempo il macchinario è disponibile alla lavorazione (ossia l'*UPTIME*) rispetto al tempo totale (ossia la somma dell'*UPTIME* e il *DOWNTIME*, intendendo quest'ultimo come il tempo in cui il macchinari non è disponibile alla lavorazione) come esposto nella figura 8; si noti che non è assicurata per la totalità di questo intervallo temporale l'effettivo utilizzo della

$$\text{stazione } k_2 = \frac{UPTIME}{UPTIME+DOWNTIME}$$

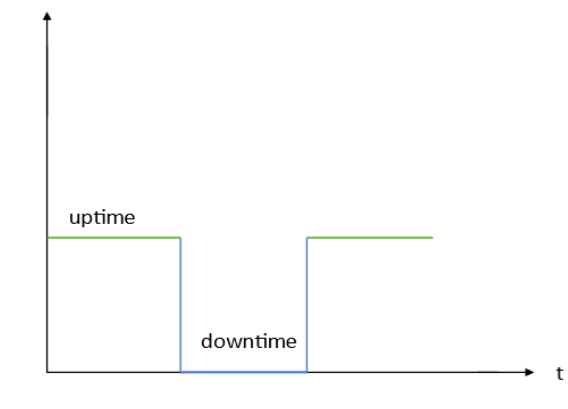


Figura 8 Up-time e Down-time macchinari

- K_3 , coefficiente di efficienza dell'operatore: tale coefficiente indica le inefficienze legate all'operatore, ovvero alle pause fisiologiche e ai cali di attenzione e stanchezza. il tutto è approssimativamente quantificato da questo coefficiente
- K_4 , coefficiente di utilizzo: è indice di quanto un determinato macchinario è stato effettivamente utilizzato durante l'*UPTIME* $k_4 = \frac{PRODUCTION TIME}{UP TIME}$ dove il

PRODUCTION TIME è, appunto, l'intervallo di tempo all'interno dell'*UPTIME* in cui il macchinario ha effettivamente lavorato.

A questo punto bisogna distinguere se la linea di produzione è di tipo sincrono o asincrono.

Nella **linea sincrona** (si veda figura 2) le stazioni sono dipendenti tra loro, ossia i pezzi che entrano nello stadio i -esimo, vengono lavorati ed entrano direttamente nello stadio successivo. In altre parole ho una serie di macchinari consecutivi e tra l'uno e l'altro non vi è nulla se non che il sistema di trasporto del materiale. Andando a dimensionare una linea sincrona, dato un certo volume produttivo da garantire, si nota immediatamente un suo grosso limite: un sovradimensionamento progressivo degli stadi a monte nella linea.

Infatti la potenzialità produttiva che una stazione deve garantire in una linea sincrona deve tener conto di tutte le inefficienze (k_1, k_2, k_3, k_4) di tutti gli stadi a valle affinché il volume produttivo generale in uscita sia quello richiesto. Per tale motivo l'espressione matematica da utilizzare per il suo calcolo è la seguente:

$$Q_J = \frac{Q_{J+1}}{\prod_{i=1}^4 (k_i)_j}$$

Si può notare che più ci si sposta a monte, più gli elementi della produttoria (sono i coefficienti k e quindi <1) aumentano e insieme a loro anche la produttività dello stadio corrispondente. A partire da questa Q_J , il numero di macchinari per ogni stazione è dato dal rapporto tra ciò che la stazione deve garantire (ossia la Q_J) e ciò che un singolo macchinario può produrre in condizioni di saturazione (ossia la potenzialità massima, $Q_{J,sat}$):

$$n = \left\lceil \frac{Q_J}{Q_{J,sat}} \right\rceil$$

Da queste ultime espressioni si deduce facilmente una giustificazione analitica di quanto detto poco fa: senza buffer, agli stadi più a monte è richiesta una produttività sempre maggiore e ciò comporta, dal momento che $Q_{J,sat}$ è una costante, un n man mano più grande.

Tale sovradimensionamento si traduce dunque nella necessità di comprare più macchinari oppure più performanti e quindi in investimenti più grandi.

Un secondo problema riguarda i down-times dei macchinari per manutenzione e i cosiddetti, per la loro breve durata, "micro-breakdowns", ossia "micro" down-times causati per esempio da guasti temporanei della macchina, da perdite di velocità o dal blocco di materiale. Spesso

la durata dei micro-breakdowns è di qualche decina di minuti (si parla quasi sempre di bloccaggi di materiale risolvibili, anche a mano, in breve tempo) e quindi molto inferiore rispetto a quella per manutenzione del macchinario definita dai down-times. Ecco il motivo per cui può capitare che citando i down-times si faccia riferimento anche ai micro down-times. Se si dovesse verificare uno qualsiasi tra questi eventi, l'intera linea sarebbe costretta ad arrestarsi. I micro-downtimes causano due fenomeni molto frequenti, ovvero lo *starving* e il *blocking*. Lo *starving* è il fenomeno per cui il macchinario a monte si ferma e dunque quello a valle non ha più componenti da lavorare. Viceversa nel *blocking* in cui lo stadio a valle si ferma e quindi quello a monte non può più depositare materiale. In entrambi i casi si hanno rallentamenti non trascurabili nella linea.

Per venire a capo di queste problematiche, tra uno stadio e il successivo, si inserisce un **buffer interoperazionale** ottenendo una **linea asincrona** (si veda figura 3).

Il buffer è un elemento di disaccoppiamento tra due stadi di lavorazione di una linea produttiva che consente l'accumulo di materiale.

Come preannunciato, questo cumulo di prodotti, consente di evitare il sovradimensionamento dell'impianto, di diminuire i fermi dovuti ai "microbreakdowns", e di evitare i fenomeni di *starving* e *blocking*.

Matematicamente parlando infatti, la potenzialità che un generico stadio deve assicurare è la seguente:

$$Q_j = \frac{Q_u}{\prod_{s=j+1}^4 (k_1)_s} \quad \text{con } \eta_j = k_{2,j} \cdot k_{3,j} \cdot k_{4,j}$$

Come si nota, l'aggiunta del buffer pone al 100% tutti i coefficienti relativi ad effetti che causano un rallentamento degli stadi a valle, non devo cioè preoccuparmi di considerare i coefficienti $k_{2,3,4}$ dello stadio a valle di un buffer. Infatti, con il suo inserimento i fermi impianto causati da queste 3 inefficienze vengono evitati dalla possibilità di accumulare materiale in questo spazio. Non vale lo stesso per il coefficiente k_1 in quanto un pezzo difettoso rimane tale anche con la presenza di un buffer.

Porta con sé però anche degli svantaggi in termini di costi, motivo per cui il suo dimensionamento ottimo è di fondamentale importanza. Tra i più significativi ed evidenti si hanno:

- spazio in cui non viene prodotto valore aggiunto, per cui quindi il cliente non è disposto a pagare
- manutenzione
- investimento
- “work in progress”, in quanto ciascun pezzo deve “aspettare” nei vari buffer prima di poter essere lavorato e diventare prodotto finito e poter dunque essere venduto

Complessivamente, in funzione della dimensione del buffer, si ottengono degli andamenti per costi di produzione (vedi *vantaggi*) e quelli del buffer stesso (vedi *costi*) come in figura 9 dove si può osservare che, giustamente, all'aumentare di *buffer size* i costi per la sua implementazione crescono mentre quelli dovuti al sovradimensionamento dei macchinari diminuiscono

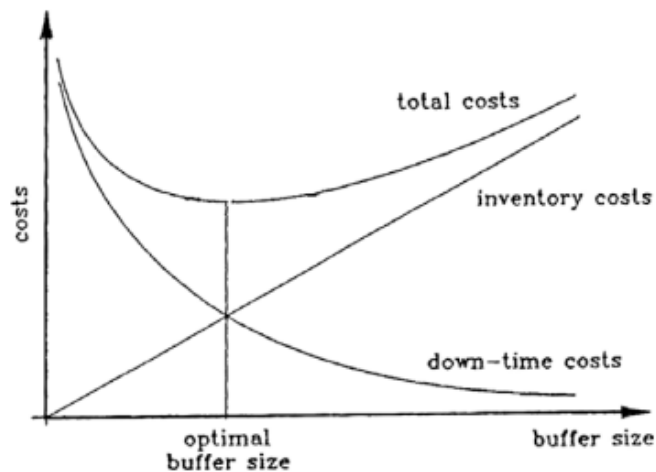


Figura 9: andamento dei costi in funzione della dimensione di un buffer

Da codesta figura si può anche osservare che dal punto di minimo della curva rappresentativa i costi totali su può ricavare la dimensione ottimale del buffer in termini di spese.

È importante notare che spesso, in casi applicativi reali, la curva dei costi di produzione, all'aumentare della prima approssimazione, nel dimensionamento del buffer si tende a far coincidere la grandezza ottimale con quella massima raggiunta durante il ciclo produttivo per ottenere la velocità di output desiderata

2.La Teoria Affidabilistica

La teoria affidabilistica rappresenta un approccio fondamentale nella progettazione e nell'ottimizzazione di sistemi complessi, come gli impianti industriali, attraverso l'analisi e la gestione dei rischi associati al loro funzionamento. Questa metodologia si concentra sull'impiego del concetto chiave del "time to failure" (TTF), ovvero il tempo che intercorre tra il momento in cui un sistema viene messo in funzione e il verificarsi di un guasto.

Nel contesto degli impianti, la teoria affidabilistica si rivela particolarmente utile per dimensionare i buffer interoperazionali, ovvero gli spazi temporali e fisici necessari per fronteggiare eventuali interruzioni o anomalie nel funzionamento del sistema. La centralità del Time To Failure (TTF) consente di valutare in modo accurato la probabilità di guasto del sistema nel corso del tempo, fornendo una base solida per la progettazione di questi impianti.

2.1 Affidabilità e Inaffidabilità dei componenti

Ogni stazione di lavorazione può essere vista come l'insieme, o il "*Sistema*", di più "*Componenti*". È necessario quindi concentrarsi sull'affidabilità del singolo componente, l'estensione ai *Sistemi di componenti* sarà una diretta conseguenza.

Esso è definito come il più piccolo gruppo costruttivo di cui è possibile conoscere il tempo al guasto, ossia il tempo prima che esso giunga a rottura.

Si possono suddividere in:

- **Componenti non riparabili:** raggiunta la rottura per via di un guasto, non possono essere riparati e rimangono inutilizzabili
- **Componenti riparabili:** a seguito della rottura, in un determinato tempo, possono essere riparati

Per primi si considerino i **componenti non riparabili**.

Il tempo al guasto è la misura del periodo di tempo che intercorre tra il momento in cui un componente viene messo in funzione e il verificarsi di un guasto o di un malfunzionamento.

In altre parole, il TTF indica la durata della fase operativa di un componente prima che si verifichi un evento indesiderato, ovvero un guasto. A partire dal rateo di guasto è possibile determinare diverse grandezze della teoria affidabilistica:

- $f(t)$ rateo di guasto non condizionato (ovvero non considera gli eventi avvenuti prima del guasto)

- $\lambda(t)$ rateo di guasto condizionato (ovvero considera gli eventi avvenuti sino ad un istante prima che il guasto si verifichi)
- $F(t)$ **inaffidabilità**, ossia probabilità che il macchinario si rompa entro un tempo prestabilito T
- $R(t)$ **affidabilità**, ossia probabilità che il macchinario sia ancora in funzione anche dopo T

In particolare, l'intervallo di missione T è l'intervallo di tempo di cui si vuole conoscere la probabilità che il componente sia in funzione. Le funzioni di affidabilità ed inaffidabilità sono la curva sottesa dalla funzione $f(t)$ prima e dopo l'intervallo di Missione T , ovvero:

- $F(t) = \int_0^T f(t)dt$
- $R(t) = \int_T^{+\infty} f(t)dt$

come mostrato in figura 10. Inoltre affidabilità ed inaffidabilità sono legati dalla relazione fondamentale:

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

la quale indica che il componente o è in funzione o è rotto.

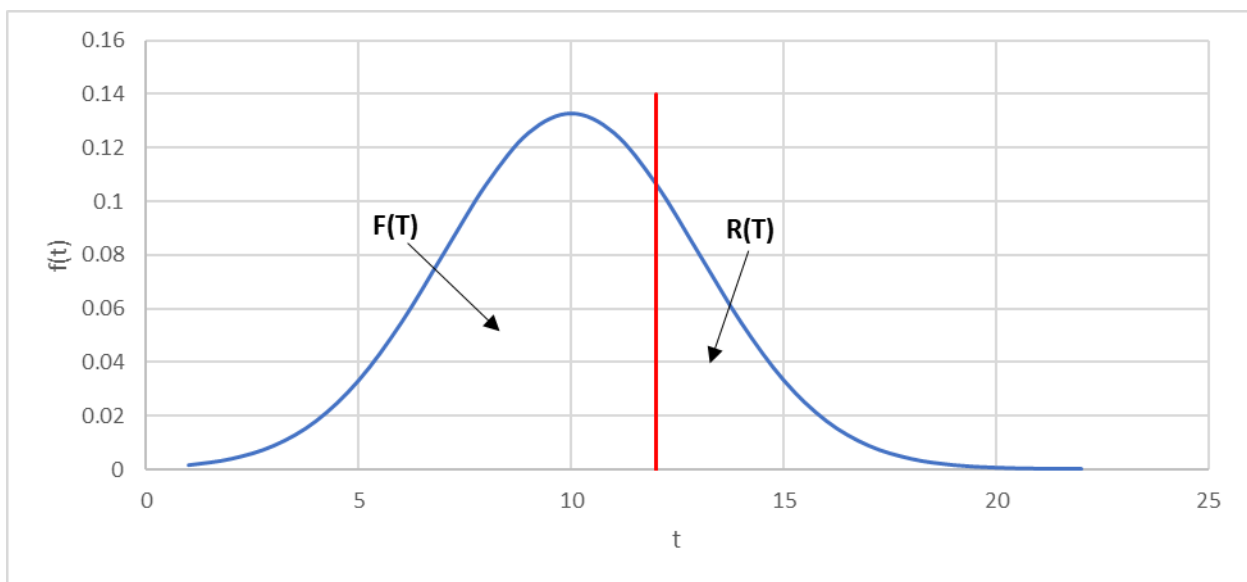


Figura 10: distribuzione gaussiana del rateo di guasto incondizionato

La relazione che invece lega i due ratei di guasto, invece, è la seguente:

$$f(t) = \lambda(t) \cdot R(t)$$

A partire da questa, è possibile ricavare l'equazione generale dell'affidabilità, ovvero:

$$R(t) = e^{-\int_0^T \lambda(t) dt}$$

Se $\lambda(t)$ è costante allora $R(t)$ potrà essere calcolata come:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot T}$$

In caso contrario, ovvero quando $\lambda(t)$ ha andamento variabile, per calcolare l'affidabilità si usa la distribuzione di Weibull che ben descrive il comportamento al guasto dei componenti, ovvero:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}$$

dove θ e β sono rispettivamente parametro di scala e parametro di forma.

In generale il parametro $\lambda(t)$ è costante quando il guasto è casuale, ovvero durante la fase intermedia di vita utile del componente. Se invece siamo nella fase di rodaggio del componente, il rateo di guasto è decrescente, mentre al contrario durante la fase di invecchiamento esso risulta crescente. Questi tre andamenti sono rappresentati dalla “curva a vasca da bagno”, che mostra l'andamento di $\lambda(t)$ al variare del tempo t (figura 11). Usando la distribuzione di Weibull, nella zona dei di rodaggio avremo che $\beta < 1$, nella zona di intermedia di vita utile avremo $\beta = 1$ e nella zona finale di invecchiamento $\beta > 1$.

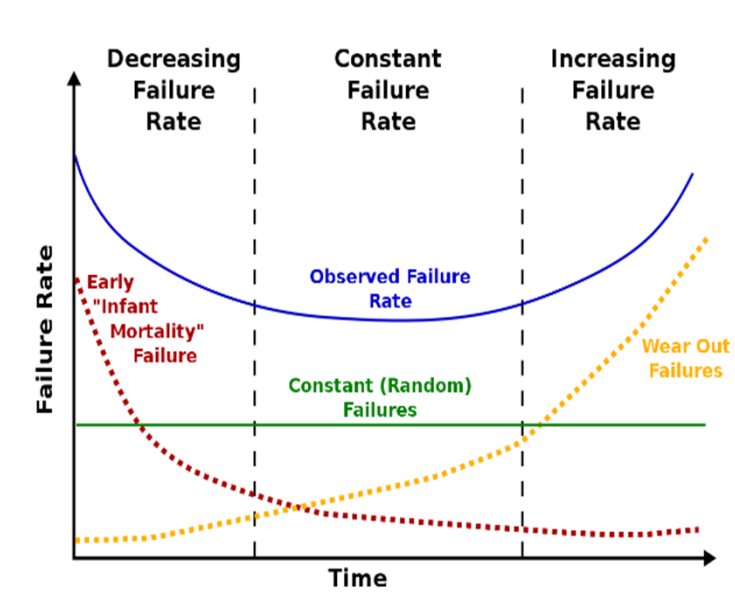


Figura 11: curva a vasca da bagno

Un'ultima grandezza di grande importanza per i componenti non riparabili è il tempo medio al guasto *MTTF - Mean Time To Failure*:

$$MTTF = \sum_{i=1}^n \left(\frac{TTF_i}{n} \right)$$

Si può inoltre dimostrare che nel caso in cui $\lambda(t)$ sia costante allora vale:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

Per quanto riguarda i **componenti riparabili** è necessario introdurre una seconda grandezza fondamentale, ovvero il tempo di riparazione del componente, il *TTR*; esso si riferisce al periodo di tempo necessario per eseguire la riparazione di un componente dopo che si è verificato un guasto o un malfunzionamento. In sostanza, il *TTR* indica la durata dell'intervento di manutenzione correttiva, ovvero il tempo impiegato per ripristinare il componente alla piena operatività dopo un guasto.

Anche questi tempi sono caratterizzati da una funzione di probabilità, ovvero la distribuzione di probabilità di aggiustamento non condizionato $g(t)$. A partire dal rateo di aggiustamento è possibile determinare diverse grandezze della teoria affidabilistica:

- $g(t)$ rateo di aggiustamento non condizionato
- $\mu(t)$ rateo di aggiustamento condizionato
- **$G(t)$ Manutentabilità**, ossia probabilità che il macchinario sia aggiustato entro un tempo prestabilito T

La funzione di manutentabilità corrisponde all'area sottesa dalla funzione $g(t)$ prima del tempo di Missione T , ovvero:

$$G(t) = \int_0^T g(t) dt$$

La relazione che invece lega i due ratei di aggiustamento, invece, è la seguente:

$$g(t) = \mu(t) \cdot [1 - G(t)]$$

A partire da questa, è possibile ricavare l'equazione generale dell'affidabilità, ovvero:

$$G(t) = 1 - e^{-\int_0^T \mu(t)dt}$$

Anche in questo caso può definire un tempo medio per la riparazione (*MTTR, Mean Time To Repair*):

$$MTTR = \sum_{i=1}^n \left(\frac{TTR_i}{n} \right)$$

Si può inoltre dimostrare che nel caso in cui $\mu(t)$ sia costante allora vale:

$$MTTR = \frac{1}{\mu}$$

Ogni ciclo di vita di un componente riparabile potrebbe essere caratterizzato da specifici valori di $G(t)$ $F(t)$ $R(t)$ a seconda dei valori del TTF e TTR di quello specifico ciclo, come mostrato nella figura 12.

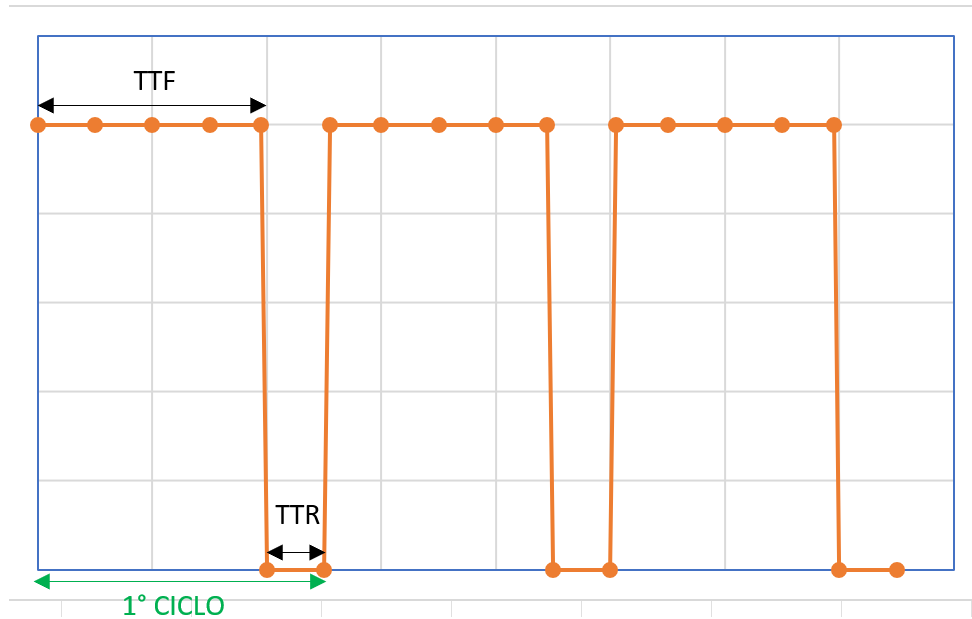


Figura 12: cicli di vita componenti riparabili

Risulta quindi utile introdurre la *Disponibilità Complessiva di un Componente A(t)*, che, in un definito un intervallo di tempo in cui sussistono un certo numero di cicli di vita, si definisce come la percentuale di tempo in cui il componente è in funzione rispetto a quella totale.

$$A(T) = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

2.2 Stima delle funzioni affidabilistiche dai dati sul campo

Si vedrà ora come è possibile stimare le funzioni viste fin'ora dai dati raccolti sul campo.

Gli unici dati direttamente misurabili dal campo sono TTF, TTR e i TBF (*Time Between Failure*: distanza temporale tra due rotture) dei componenti costitutivi dei macchinari. Per semplicità verranno indicati in seguito con t_i .

Innanzitutto è fondamentale capire se i dati che si hanno a disposizione sono completi o censurati. Nel caso di dati completi e non censurati quindi, la procedura per cui si può ricavare l'andamento dell'affidabilità di un macchinario inteso come sistema di componenti, è composta da due passaggi:

- 1) Stima dell'affidabilità puntuale $\widehat{R}(t_i)$ con delle funzioni statistiche
- 2) Stima dell'andamento complessivo dell'affidabilità $R(t)$ tramite la regressione lineare e il metodo dei minimi quadrati

Il primo step è risolvibile mediante, ad esempio, tre metodi noti come *Direct Method (DM)*, *Improve Direct Method (IDM)*, *Median Rank Method (MRM)*. Tutti questi necessitano delle seguenti ipotesi per poter essere applicati:

- I dati (t_i) sono completi
- I componenti sono riparabili
- I dati sono ordinati in ordine crescente

Un esempio di risultato a cui essi portano è quello esposto in figura 13.

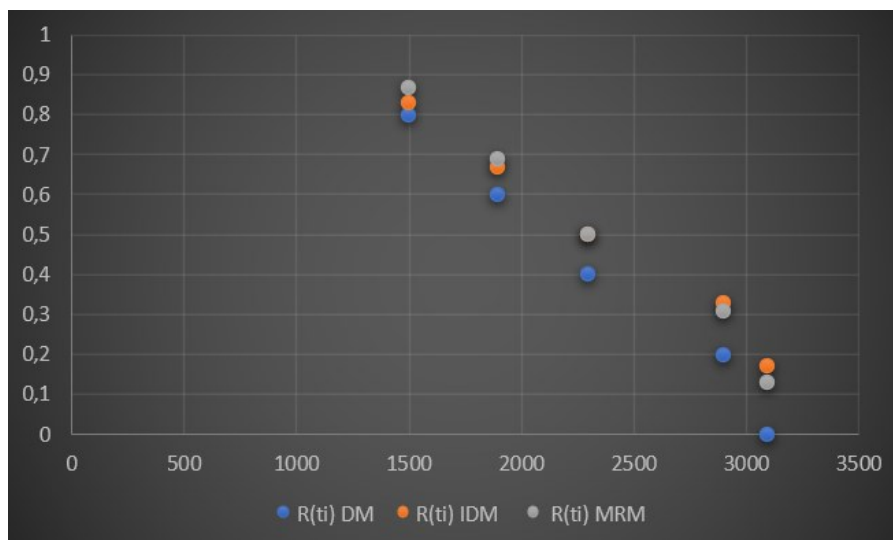


Figura 13: esempio risultato DM, IDM, MRM

Una volta calcolato $\widehat{R}(t_i)$ si utilizzeranno la regressione lineare e il metodo dei minimi quadrati per determinare la funzione reale $R(t)$.

In formule:

- $y_i = \ln \left(\ln \frac{1}{R(t_i)} \right)$
- $x_i = \ln t_i$
- $a = -\beta \cdot \ln \theta$ (intercetta)
- $b = \beta = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}$ (coefficiente angolare)

Infine, per verificare la “bontà” della regressione lineare si calcola il *coefficiente di correlazione lineare* r così definito:

$$r = \frac{\frac{1}{n} \cdot \sum_i (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{n}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}{n}}}$$

Tipicamente si tratta di una buona correlazione quando r è > 0.8).

D'altra parte, l'analisi dell'affidabilità di un sistema può essere influenzata da dati censurati, specialmente quando si considerano il Time to Failure (TTF) e il Time to Repair (TTR). La censura si verifica quando non si dispone di informazioni complete sulla durata di vita di un componente o sulla sua riparazione. Ad esempio, potrebbe accadere che alcuni componenti non abbiano ancora manifestato un guasto al momento in cui si interrompe l'osservazione o l'analisi, rendendo i dati censurati.

Solitamente i dati censurati vengono distinti in:

- **Censura a Destra:** In questo caso, la censura avviene quando un'osservazione termina prima che l'evento di interesse (guasto o malfunzionamento) si verifichi. Ad esempio, se un componente non ha ancora guastato al termine del periodo di osservazione.
- **Censura a Sinistra:** Si verifica quando l'inizio dell'osservazione avviene dopo che l'evento di interesse è già avvenuto. In questo caso, si hanno solo informazioni sulla durata di vita residua del componente.
- **Censura a Intervallo:** nel caso in cui si abbia sia la censura a destra che a sinistra.

Nel calcolo dell'affidabilità, è importante affrontare la presenza di dati censurati per ottenere stime accurate e significative. Sono utilizzate diverse tecniche statistiche, come la censura a destra, per gestire queste situazioni. Queste metodologie consentono di integrare i dati

censurati nella valutazione dell'affidabilità di un componente, fornendo una prospettiva più realistica sulla sua performance nel tempo. In questo modo, la teoria affidabilistica si adatta alla complessità del mondo reale, dove non sempre è possibile ottenere dati completi sulla durata di vita e sul tempo di riparazione dei componenti di un sistema.

Minitab® è un software statistico ampiamente utilizzato per l'analisi dei dati e può essere prezioso quando si affronta la censura a destra nella teoria affidabilistica. Quando si lavora con dati censurati, Minitab® offre strumenti specifici che consentono di gestire e analizzare tali informazioni in modo efficace. Modelli come il modello di Weibull possono essere implementati da questo software per stimare la funzione di affidabilità e affrontare la censura a destra.

Inoltre, Minitab® fornisce strumenti grafici che consentono di visualizzare chiaramente i dati censurati e le stime dell'affidabilità nel tempo. Questi grafici possono includere diagrammi di probabilità di sopravvivenza e curve di affidabilità cumulative, fornendo una rappresentazione visiva della performance del sistema.

Con le sue funzionalità di analisi avanzata e la capacità di gestire dati censurati, Minitab® si configura come uno strumento potente per gli esperti che desiderano condurre analisi affidabili e approfondite su sistemi complessi.

3. Il B.A.P.

Le tematiche principalmente discusse riguardo i buffer sono il loro **posizionamento** e soprattutto il loro **dimensionamento** ottimale, da cui l'acronimo "BAP", Buffer Allocation Problem. Per quanto riguarda il posizionamento, molti articoli nella letteratura, sottolineano come la distribuzione ottimale di questi dispositivi debba seguire la sagoma di una ciotola rovesciata con, quindi, maggiore densità al centro della linea produttiva (concetto introdotto da Hillier e Boiling, 1977).

Tuttavia questo elaborato si concentra sulla seconda tematica, ossia il dimensionamento. Nonostante le molteplici versioni di risoluzione di questo "problema", il BAP si può classificare in base al suo obiettivo

- Minimizzare il tempo di attraversamento della linea
- Massimizzare il throughput di linea

Altri studi mirano anche alla minimizzazione dei W.I.P (*Cruz et al., 2008; Seo and Lee, 2011; Pngazhenthil and Xavier, 2015; Xi et al., 2019*), dei tempi di attesa (*Abdul-Kader et al., 2011*) o alla massimizzazione del profitto (*Hillier, 2000; Van Nieuwenbuijse et al., 2007; Massim et al., 2010*).

3.1 Metodi Basati sulla Valutazione delle Performance

Il BAP è stato studiato per più di cinquant'anni e diversi metodi per la sua risoluzione sono stati elaborati ed applicati. Articoli estremamente esaustivi che riportano una panoramica sulla storia della letteratura del BAP sono il lavoro di *Demir et al., 2014* e di *Weiss et al., 2019*. Secondo quest'ultimo i metodi di BAP possono essere divisi in 3 categorie a seconda della maniera in cui vengono incorporati i metodi basati sulla valutazione delle performance:

1. Metodi basati su soluzione esplicite
2. Metodi di ottimizzazione integrata
3. Metodi di ottimizzazione iterativa

Verranno analizzati per primi i metodi valutativi e a seguire i tre appena elencati dal momento che sono alla base della loro validazione.

I metodi per la valutazione delle performance si basano sulla stima delle prestazioni dell'intero impianto a partire da definite dimensioni e locazioni dei buffer, avendo come obiettivo quello di massimizzarne la produttività.

Tra i più noti vi è il **metodo della catena di Markov**, utilizzato per descrivere processi stocastici, ossia processi descrivibili dall'andamento nel tempo di un insieme di variabili aleatorie come il nostro impianto automatizzato, di cui non posso prevedere con certezza la ricorrenza temporale dei microbreackdowns. Il metodo è particolarmente utile per caratterizzare i cambiamenti di stato del mio sistema, infatti prevede la definizione di una matrice (*Matrice Delle Probabilità Di Transizione*) **P** il cui elemento generico p_{ij} definisce la probabilità di transizione del sistema da uno stato i ad uno stato j . Tale matrice è quadrata e la somma degli elementi di ogni riga è unitaria dal momento che rappresenta la probabilità di transizione dallo stato i ad ogni possibile stato, come in figura 14.

		0	1	2	3
0	0	1	0	0	
1	0.5	0	0.2	0.3	
2	0	0	0	1	
3	1	0	0	0	

Figura 14: Matrice delle probabilità di transizione

Mediante quindi alcune operazioni fatte su tale matrice è possibile conoscere lo stato in cui si troverà il sistema dopo un dato tempo o la probabilità che questo passi da uno stato i ad uno stato j seguendo un determinato percorso di stati.

Tuttavia, al crescere di elementi nel sistema (ossia di variabili aleatorie), crescono esponenzialmente i possibili stati che esso può assumere e quindi trovare soluzioni significative diventa estremamente complesso. Per tale motivo, come spiegato da *Gershwin and Schick, 1983*, è possibile studiare i possibili stati di una linea di produzione tramite questo metodo solo se questa è composta al massimo da tre stazioni.

Un altro approccio valutativo è costituito dai **metodi di scomposizione e aggregazione**: se ho una linea così grande (elevato numero di stazioni) da renderne lo

studio tramite le catene di Markov eccessivamente complesso, è sufficiente dividerla in più sotto-linee studiarne i comportamenti e, in seguito, sovrapporre gli effetti.

In particolare nelle, sotto-linee, i buffer interoperazionali hanno le stesse dimensioni della linea iniziale, mentre, per ottenere conservazione di flusso di materiale rispetto al caso di partenza, parametri come i TBF, TTR o i tempi di lavorazione sono leggermente modificati. Questi sotto sistemi vengono poi caratterizzati con le catene di Markov precedentemente analizzate.

Per quanto riguarda l'aggregazione, ciascuna sotto-linea con due stazioni e buffer (come quella in figura 15) intermedio viene considerata come un'unica stazione equivalente.

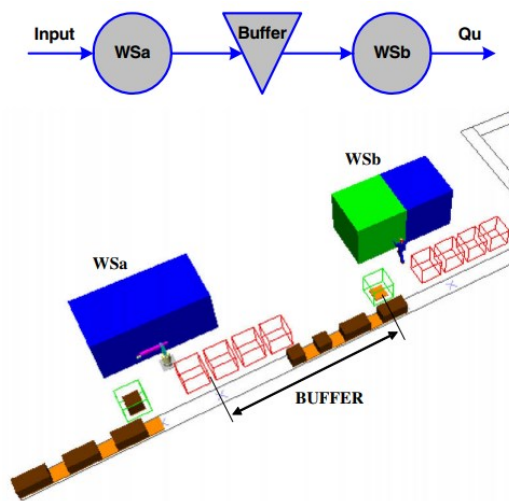


Figura 15: sottolinea considerata

Lo stesso si ripete ciclicamente finché la linea di partenza non viene rappresentata da un numero ristretto di stazioni equivalenti, come mostrato in figura 16

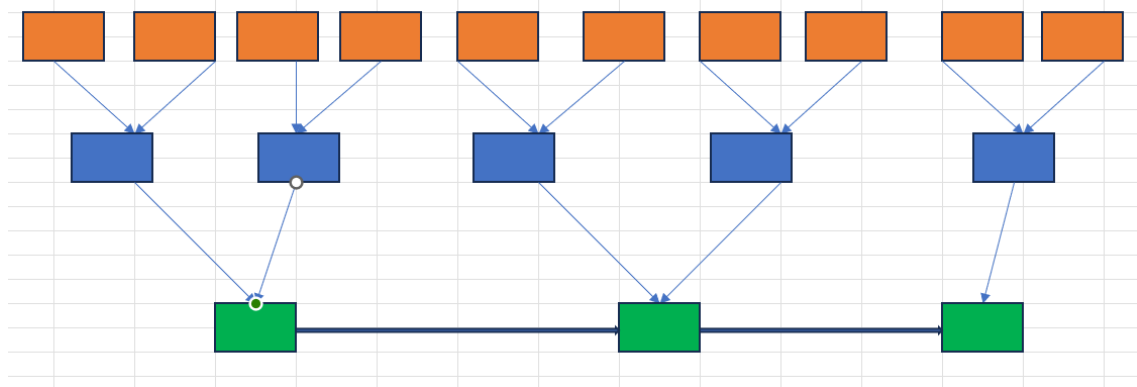


Figura 16: schema metodo decomposizione e aggregazione

Altro metodo interessante è quello basato sulla **Teoria delle code**.

Essa si applica in generale a qualsiasi sistema fisico che presenti fenomeni di accodamento (si veda figura 17) e consente di determinare alcuni parametri che descrivono le prestazioni di tale sistema.

In particolare, richiede per prima cosa la determinazione dei parametri caratteristici degli elementi fondamentali di un sistema con accodamento (che sono quindi gli “input” dell’algoritmo), ossia:

- La popolazione dei clienti: l’insieme delle entità che richiedono un determinato servizio (nel nostro caso quindi è il semilavorato/materia prima, che richiede di essere lavorato)
- Il processo degli arrivi o intertempo d’arrivo: è l’andamento temporale degli arrivi del cliente dal servitore
- La coda: insieme dei clienti in attesa di essere serviti (che nel nostro caso coincide con la dimensione del buffer precedentemente determinata tramite, per esempio, un metodo generativo)
- I servitori: le entità che forniscono i servizi (ossia le stazioni di lavorazione)
- Il processo dei servizi: tempo che impiega un servitore ad erogare il servizio per un cliente (vale a dire il tempo di lavorazione di un pezzo in un determinato stadio di processo)
- La disciplina dei servizi: ordine prioritario con cui le stazioni di servizio soddisfano i clienti

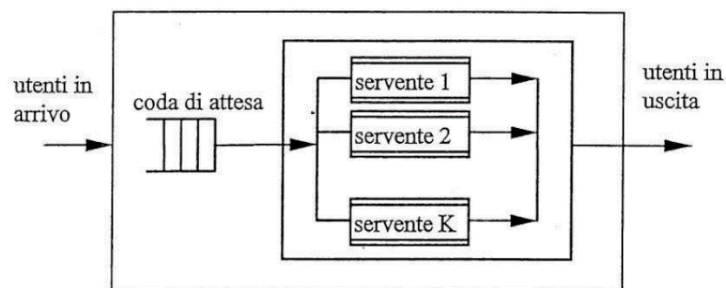


Figura 17: schema sistema con fenomeni di accodamento

Caratterizzati questi, fornisce in output i seguenti indici di performance del sistema:

- Numero medio di clienti nel sistema, sia in attesa che in atto di essere serviti (L_s)
- Numero medio di clienti in attesa di servizio (L_m)
- Tempo medio d'attesa del cliente (W_s)
- Probabilità che, quando il sistema ha raggiunto il suo ritmo di regime, vi siano ancora n clienti (o in attesa o in atto di essere serviti) in esso (p). Da notare che una volta che un cliente ha ricevuto il servizio è considerabile non più appartenente al sistema
- Fattore di utilizzazione dei servizi inteso come frazione di tempo in cui il servitore sta effettivamente servendo il cliente rispetto al tempo totale in cui è disponibile ad erogare il servizio (q).

Come si può osservare è un metodo molto semplice in cui le caratteristiche del sistema studiato si avvicinano molto a quelle di una micro linea formata da due stazione con buffer interoperazionale e di conseguenza anche gli indici appena riportati ne rispecchiano alcune importanti prestazioni.

Tuttavia queste informazioni non sono sufficienti a determinare univocamente la resa della effettiva della nostra linea industriale, bensì portano a risultati piuttosto approssimati che talvolta conducono a sovra o sotto dimensionare l'impianto (si pensi solamente al fatto che non vengono considerate le eventuali inefficienze del sistema che nel nostro ambito si traduce in $F(t)$, TTF, TTR, durata del micro breackdown, eccetera). Inoltre, questo algoritmo può essere applicato solo a problemi di piccole dimensioni, quindi micro-linee da 2 stazioni e buffer interoperazionale.

Un ultimo metodo valutativo è il **metodo simulativo**.

I metodi finora affrontati producono buoni risultati solo per linee di piccole dimensioni (con pochi stadi di lavorazione), mentre per linee più grandi risultano piuttosto approssimati. Se l'obbiettivo è invece quello di ottenere risultati accurati per linee complesse, la simulazione offre molti vantaggi da questo punto di vista.

Essa viene effettuata tramite un software (come ad esempio *FlexSim*, che è quello che verrà utilizzato nel caso studio) ed ha lo scopo, appunto, di simulare (definendone tutti i parametri caratterizzanti) realisticamente il comportamento della linea di produzione e di tutti i suoi elementi.

Tale software è implementato su un elemento digitale (per esempio un calcolatore), la cui scala dei tempi è discretizzata, ossia suddivisa in intervalli di tempo discreti (es: $1\mu s$) ed infatti questo tipo di simulazione è detta "*ad eventi discreti*".

Usando i termini di *Demir(2013)*, l'approccio simulativo è chiaramente valutativo, ma può essere usato anche come metodo generativo, infatti considerando la capacità del buffer come input ulteriore al programma posso analizzarne le sue variazioni in relazione agli altri parametri di output (ossia guardare a quale valore del, ad esempio, throughput di produzione corrisponde un certo valore della dimensione del buffer) finché non trovo la soluzione che massimizza tali output.

Derivati dai metodi simulativi sono quelli che si propongono di risolvere il BAP attraverso formule sperimentali. In questo caso infatti, a seguito di svariate simulazioni eseguite su altrettanti dati di input (addirittura vengono realizzate più simulazioni sullo stesso set di dati), si cerca di dedurre una formula sperimentale facilmente applicabile dalle aziende per ricavare il dimensionamento ottimale dei buffer interoperazionali. Una soluzione di questo tipo è stata proposta da *Battini (2013)*.

In questo studio sono state effettuate più di una simulazione per ogni set di parametri di input (come, per esempio, up-time e down-time dei macchinari e i parametri di scala e forma di Weibull) appartenente a sua volta ad una vastissima base dati, con lo scopo di definire la capacità minima del buffer necessaria a garantire, o migliorare, un dato throughput di produzione.

Il sistema considerato è solamente la “sotto-linea” formata da 2 macchine aventi la stessa velocità di produzione e un buffer intermedio e coincidente con il collo di bottiglia di quella intera, ovvero tale per cui un guasto su di essa comporta una fermata per tutta la linea.

Gli output sono la dimensione massima (C_{max}) e media (C_{av}) assunte dal buffer e il throughput di produzione. A questo punto, per ricavare una legge a partire da essi, *Battini*, ha considerato come variabile dipendente il termine $\frac{C_{max}}{Q}$ e come variabile indipendente ha cercato chi più tra tutti fosse sensibile alle variazioni di $\frac{C_{max}}{Q}$ e lo ha identificato con $G = MTTR_{max}$, dove $MTTR_{max}$ è il massimo MTTR tra macchinario a monte e a valle.

La legge sperimentale ricavata è la seguente:

$$C_{max} = K(P, R, \beta) \cdot G \cdot Q$$

dove

- C_{max} è la capacità massima del buffer raggiunta durante la simulazione, la minima dunque da garantire
- Q è la velocità di produzione in pezzi/ora
- $G = MTTR_{max}$

- $P = \left(\frac{A_i}{A_{i-1}} \right)$
- $R = \left(\frac{MTTR_i}{MTTR_{i-1}} \right)$
- β è il parametro di forma della distribuzione di Weibull
- K è il *fattore di sicurezza*, funzione di P , R e β , che tiene conto del tipo di guasto (cfr. pagina 3) e assume un valore circa pari a 6.2

3.2 Metodi basati su soluzione esplicite

Questa categoria include metodi che stabiliscono formule o regole per il dimensionamento del buffer intermedio. Tali formule possono derivare da metodi analitici esatti, metodi analitici basati sulla valutazione di performance più approssimate e metodi basati sullo studio delle caratteristiche ottimali del buffer.

I **metodi analitici esatti** si basano su procedimenti per la valutazione esatta delle prestazioni del sistema, ossia a partire dalle precise caratteristiche della linea richieste in termini di performance. Quindi, dal momento che si hanno grandi restrizioni, diventa estremamente difficile generare formule analitiche esatte per il dimensionamento e di conseguenza questi metodi sono applicabili solo a linee con 2 stazioni. Un esempio pratico di questi metodi passa sotto il nome di **Metodo del Serbatoio**, secondo il quale la dimensione finale del buffer che deve essere garantita è la seguente:

$$BUFFER = (1 + c) \cdot (\Delta_{max}^+ + \Delta_{max}^-)$$

dove:

- c è un coefficiente di sicurezza (circa 10%).
- Δ_{max}^+ è il surplus di pezzi accumulati dal buffer dovuto al fatto che il macchinario a monte del buffer porta in uscita più materiale di quanto quello a valle elabora in ingresso
- Δ_{max}^- è il deficit di pezzi, che deve garantire il buffer, causato da una maggiore quantità di materiale richiesti dal macchinario a valle rispetto a quello “offerti” dalla stazione a monte

Le due figure 18 e 19 di seguito consentono di comprendere meglio quanto appena definito.

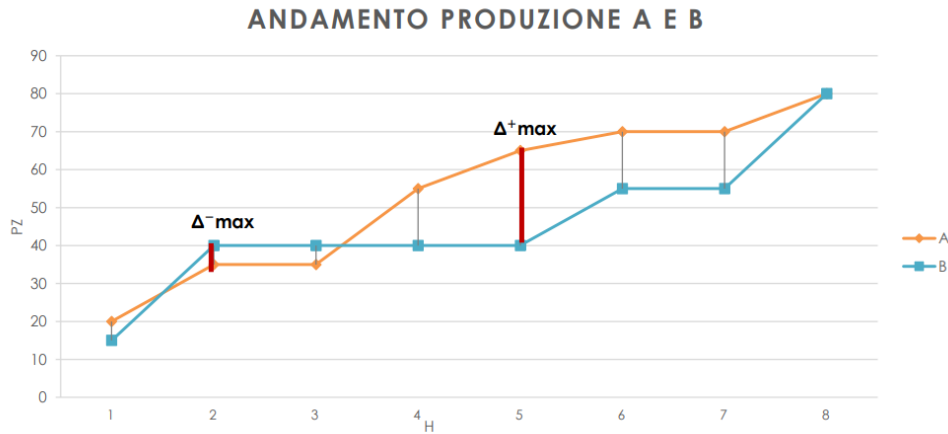


Figura 18: Δ^+_{max} e Δ^-_{max}

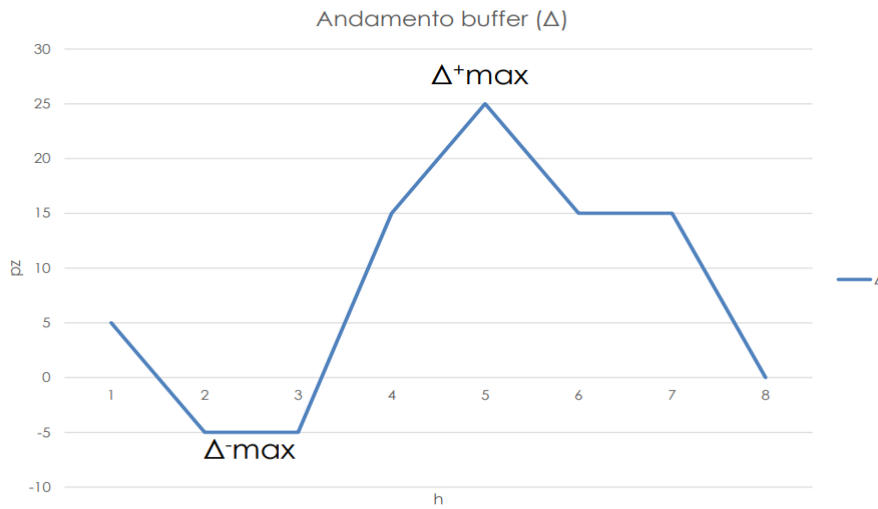


Figura 19: andamento del buffer

I metodi analitici basati sulla valutazione approssimativa delle performance vengono usati per allentare alcune delle ipotesi restrittive del metodo precedente e quindi per poter applicare le formule risultanti a problemi di dimensioni maggiori. Essi puntano a trovare una formula analitica approssimata per la valutazione delle performance della linea in funzione della capacità del buffer. Quest'ultima viene ricavata in 2 modi: mediante modelli di regressione e tramite soluzioni approssimative in forma chiusa.

I primi sono tecniche utilizzate per analizzare dati che consistono in una variabile dipendente (in questo caso la capacità del buffer) e una serie di variabili indipendenti (i parametri caratteristici di una linea di produzione). Consentono poi di ricavare un'*equazione di regressione* ovvero una funzione ricavata a partire dalla serie di dati appena citata che descrive, appunto gli andamenti delle variabili indipendenti in funzione di quelle dipendenti. Per poter ricavare

da essa informazioni importanti sul dimensionamento dei buffer, non essendo equazioni in forma chiusa, si usa ad esempio il metodo dei minimi quadrati (si veda paragrafo 2.2).

Per quanto riguarda le soluzioni approssimative in forma chiusa (ossia espressioni che contiene esclusivamente funzioni note e comuni come quella logaritmica, esponenziale, la radice quadrata e via dicendo), queste, come nel caso precedente, seppur con un grado di approssimazione maggiore, forniscono sempre una funzione che descrive i parametri della linea in funzione della capacità del buffer, ma, appunto, in forma chiusa.

Questa loro caratteristica consente di calcolare l'allocazione e dimensionamento ottimo dei buffer tramite una semplice derivata.

Infine, i **metodi basati sullo studio delle caratteristiche ottimali del buffer**, sono metodi che, contrariamente a quelli visti finora, in un primo step generano una soluzione senza restrizioni (ossia le specifiche richieste su alcuni parametri della linea) per allocazione e dimensionamento dei buffer, per esempio riadattando al sistema considerato posizionamenti e dimensionamenti già noti (come il posizionamento a ciotola rovesciata, *Hilier e Boiling, 1977*) oppure mediante la enumerazione completa (*Enginarlar et al., 2005a*). In entrambi i casi dovrà essere valutata la bontà della soluzione (mediante uno dei metodi valutativi di cui sopra). Nella seconda fase vengono derivate regole per dimensionamento e allocazione del buffer sulla base dei risultati del primo step. Affinché queste siano effettivamente riconosciute come solidi principi e quindi applicabili nella realtà, vengono prima testate mediante valutativi. Quindi le restrizioni, anche se in un secondo momento, vengono comunque applicate.

3.3 Metodi di ottimizzazione integrata

Questi metodi utilizzano formulazioni di valutazione delle prestazioni basate su campioni e risultati analitici in modo tale che i solutori di programmazione lineare e intera standard diventino applicabili al problema di ottimizzazione.

Nel primo caso, programmi lineari o programmi lineari interi misti, modellano il sistema mediante una serie di campioni di parametri caratterizzanti il sistema. Gli andamenti discreti che risultano da tale campionamento vengono poi dati in input ai software risolutori lineari i quali forniscono la soluzione ottimizzata. Tutti i metodi di campionamento comportano un errore di campionamento nelle rappresentazioni delle variabili di una linea, più o meno grande a seconda del tempo di campionamento (intervallo temporale tra 2 campioni contigui).

Nel secondo caso, invece del campionamento, si utilizzano espressioni analitiche approssimate per descrivere il comportamento del sistema che vengono poi, con gli stessi scopi di prima, passate ad un risolutore di programmazione intera standard.

3.4 Metodi di ottimizzazione iterativa

Prevedono la combinazione ciclica (iterativa) di un metodo generativo e di un metodo valutativo producendo ad ognun ciclo una soluzione sempre migliore, nel modo mostrato in figura 20.

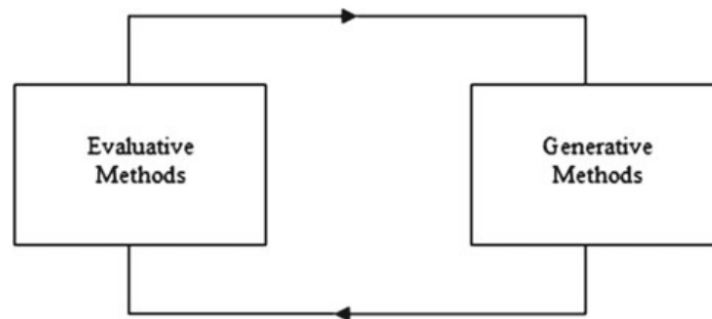


Figura 20: schema metodi iterativi

Il primo genera delle possibili soluzioni di dimensionamento a partire da alcune specifiche di input (ad esempio il volume produttivo in uscita dalla linea, o i parametri dei macchinari come quelli sopra elencati) e il secondo ne verifica la validità riportando in output alcuni parametri di performance della linea (come il throughput ³ della linea, la lunghezza degli accodamenti nei buffer); se la soluzione non è quella ottima (in termini, per esempio di throughput minimo da garantire) allora, iterativamente, si riparte dalla generazione e si rivaluta quella nuova sino al raggiungimento di quella ottimale.

Anche di questi metodi ne possono essere individuati di svariati tipi ma i più rilevanti sono gli algoritmi meta euristici, gli algoritmi di ricerca e la programmazione dinamica.

Gli **algoritmi meta euristici** sono processi di generazione iterativa che uniscono opportunamente un insieme di algoritmi provenienti da svariati ambiti per la risoluzione del B.A.P; tra essi sono spesso utilizzati algoritmi genetici, il metodo dell'entropia incrociata, algoritmi immunitari artificiali, ottimizzazione dello sciame di particelle. Per via della loro struttura del tutto generica e quindi della loro vasta applicabilità, rendono trattabile anche

L'ottimizzazione per lunghe linee fino a 700 stazioni. Lo svantaggio principale di questi algoritmi è che non prendono in input i parametri specifici del sistema, ma dei loro alias. Per tale motivo i risultati a cui portano sono spesso molto approssimati.

Gli **algoritmi di ricerca** sono anch'essi algoritmi che iterativamente generano e poi valutano una soluzione per l'allocazione e il dimensionamento. Quelli che verranno trattati sono gli algoritmi di ricerca basati sul collo di bottiglia

Gli *algoritmi di ricerca basati sul collo di bottiglia* determinano iterativamente il collo di bottiglia della linea, ossia la stazione che non riesce a seguire un eventuale aumento della produttività richiesta rallentando di conseguenza l'intero processo produttivo; e, in base ad esso, posizionano e dimensionano opportunamente i buffer intermedi (*Chiang et al. (2000)*, *Li (2013)*, *Kuo et al. (1996)* e *Sabuncuoglu et al. (2006)*). Degli studi condotti da *Vergara e Kim (2009)* hanno portato, testando numericamente (ossia tramite simulazione) 6 diversi di questi algoritmi, ad affermare che deve essere aggiunta capacità in termini di pezzi al buffer a monte delle stazioni che sono specialmente soggette allo *starving*.

I *metodi del gradiente* sono in generale tecniche che consentono di calcolare i punti di massimo e minimo di una funzione differenziabile a più variabili che nel nostro caso sarà quella che descrive le performance del sistema.

Qualora la funzione ricavata sia difficilmente differenziabile si utilizzano gli *algoritmi di ricerca senza derivate*.

Gli *algoritmi basati sulle proprietà strutturali del BAP* sono algoritmi creati "ad-hoc" che, per via di questa esclusività, tramite un numero limitato di iterazioni riescono ad arrivare alla soluzione. Tali proprietà strutturali vengono spesso ricavate con procedure di generazione esatte come l'enumerazione completa.

Infine, gli *algoritmi di ricerca "primal-dual"* si basano su algoritmi veloci per massimizzare il throughput della linea (*dual problem*) con lo scopo di risolvere il *primal problem* (minimizzare il numero e la dimensione dei buffer pur mantenendo un throughput minimo).

Per quanto riguarda infine i metodi di **programmazione dinamica**, sono criteri che scompongono il BAP in più sottoproblemi, o meglio suddividono la linea iniziale in più sottolinee ottimali (ossia le cui soluzioni consentono di trovare la soluzione ottima del problema complessivo) similmente ai metodi di scomposizione e aggregazione con la

differenza che in questo caso le soluzioni di dimensionamento vengono anche generate oltre che valutate.

4.Applicazione

In questo capitolo si vedrà un caso applicativo di dimensionamento di un buffer tra due macchinari di un impianto di produzione automatizzato con una produttività richiesta di 25000 pezzi orari. In particolare si tratta di una macchina per l'etichettatura e una macchina per il confezionamento, come illustrato in figura 21. In particolare vedremo come sia possibile a partire dai dati raccolti sul campo, stimare le funzioni affidabilistiche di questi due macchinari per poi utilizzarle in un simulatore e simulare l'andamento della produzione su due turni di lavoro. In base a questo è quindi possibile valutare la dimensione del buffer.

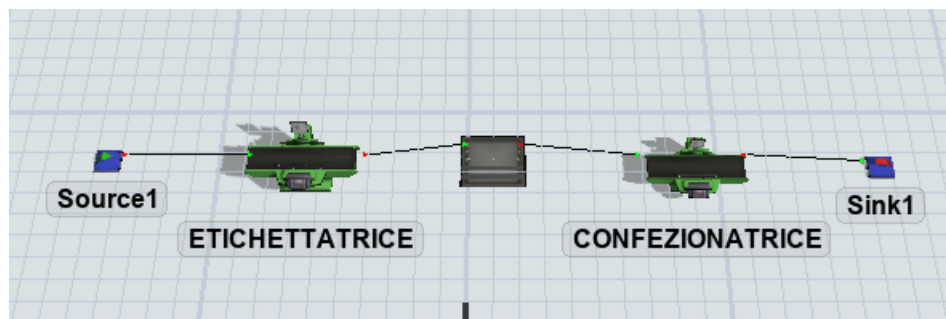


Figura 21: Simulazione di etichettatrice e confezionatrice

4.1 Input Data

I **dati di partenza** sono presentati nella tabella 1 e 2, e riguardano:

- Le velocità di processamento di ciascuna stazione espressa in pezzi orari ed il relativo tempo ciclo espresso in secondi al pezzo
- Le deviazioni standard del tempo di lavorazione espresse in secondi al pezzo
- I dati riferiti a 5 giornate di lavoro su due turni in cui sono registrati gli orari in cui le due macchine si sono fermate e sono poi ripartite (come in tabella 2).

Per poter ora conoscere l'affidabilità dei macchinari sfruttando la distribuzione di Weibull, è necessaria una rielaborazione dei dati. Verrà calcolato il tempo intercorso tra una fermata e l'altra (TBF) e la durata della fermata stessa (TTR) in secondi (rielaborazione necessaria per poter applicare le funzioni della *Teoria Affidabilistica* vista nel Capitolo 2). Esempio in tabella 3.

Macchina	Velocità [pz/h]	Tempo lavorazione [s/pz]	Deviazione std [s/pz]
Etichettatrice	29450	0.122241	0.001
Confezionatrice	29200	0.123288	0.001

Tabella 1: dati di input

TBF	TTR
	1/3/23 6.00
1/3/23 6.57	1/3/23 7.01
1/3/23 7.40	1/3/23 7.41
1/3/23 8.24	1/3/23 8.24
1/3/23 9.20	1/3/23 9.24
1/3/23 10.16	1/3/23 10.19

Tabella 2: Esempio di dati raccolti dall'Etichettatrice

TBF	TTR	TBF[s]	TTR[s]	Censurato
1/3/23 17.47	1/3/23 17.48	1563	61	0
1/3/23 18.31	1/3/23 18.32	2668	20	0
1/3/23 19.21	1/3/23 19.25	2958	271	0
1/3/23 20.15	1/3/23 20.19	3245	255	0
1/3/23 20.44	1/3/23 20.45	1783	34	0
1/3/23 21.12	1/3/23 21.15	1668	167	0
1/3/23 21.20	1/3/23 21.23	470	147	0
		2365		1

Tabella 3: Esempio di dati rielaborati dell'Etichettatrice

Per comprendere tali rielaborazioni, consideriamo per esempio l'etichettatrice: essa si è fermata per una microfermata alle 06.57 e dunque, essendo partita alle 06.00, il primo TBF avrà durata di 3420 secondi; inoltre essendo ripartita alle 07.01, il primo TTR avrà durata di 240 secondi. Infine si può notare sempre dalla terza tabella che, poiché al termine della giornata lavorativa ogni macchinario viene forzatamente fermato, non si può conoscere a quale orario oltre le 22.00 si sarebbe spontaneamente bloccato. Questo è il chiaro esempio di un dato censurato a destra (si veda il paragrafo 2.2), motivo per cui va aggiunto il parametro "censurato" e posto pari a 1 infatti, quei TBF e TTR non sono veritieri. Per tutti gli altri invece verrà impostato a 0.

4.2 Analisi dei dati

Dall'elaborazione dei dati si sono quindi ottenuti due insiemi distinti di dati che rappresentano le distribuzioni di TBF e TTR dei due macchinari. Questi sono stati analizzati con Minitab® che, tramite la funzione “*Reliability Analysis*”, permette di ricavare i parametri di forma (β) e di scala (θ) delle distribuzioni di Weibull dei due macchinari.

Questo software, tramite il metodo dei minimi quadrati, stima i valori dei parametri della distribuzione di $R(t)$ restituendo il coefficiente di correlazione come parametro di valutazione. È inoltre possibile indicare, come in questo caso, se i dati sono censurati o meno.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti (Figure 22, 23, 24, e 25), in cui viene riportato, oltre a θ (“*scale*”) e β (“*shape*”) il coefficiente di correlazione lineare r (“*Correlation*”).

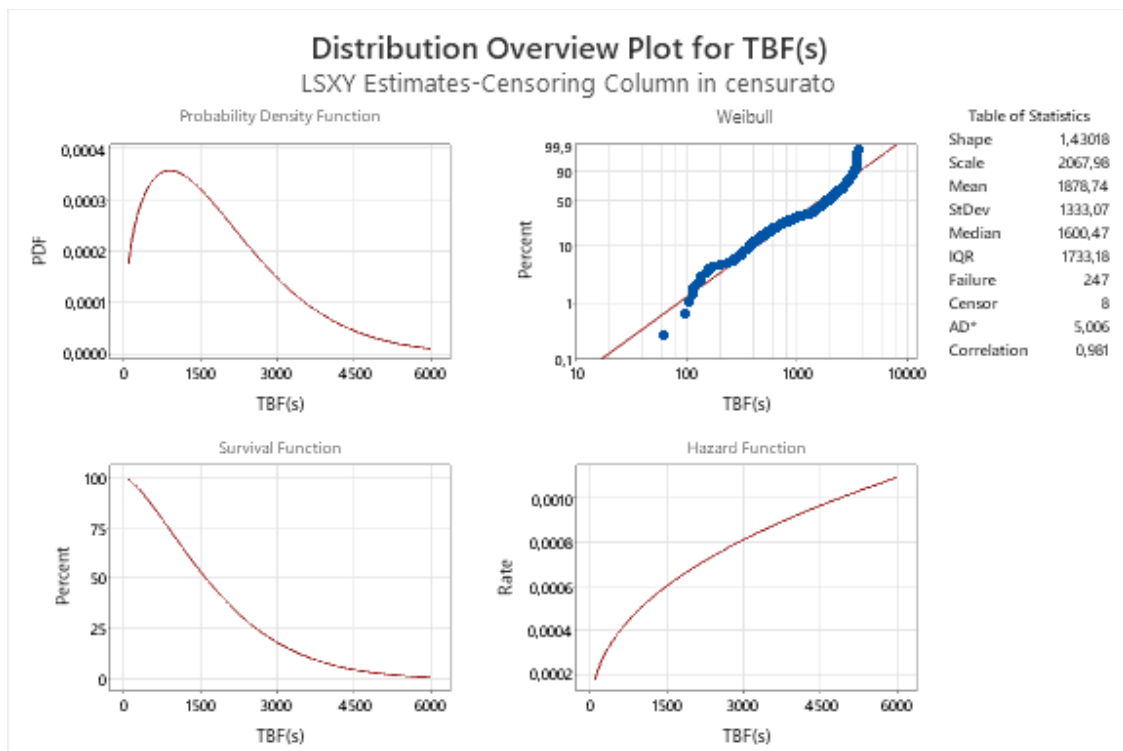


Figura 22: distribuzione TBF Etichettatrice

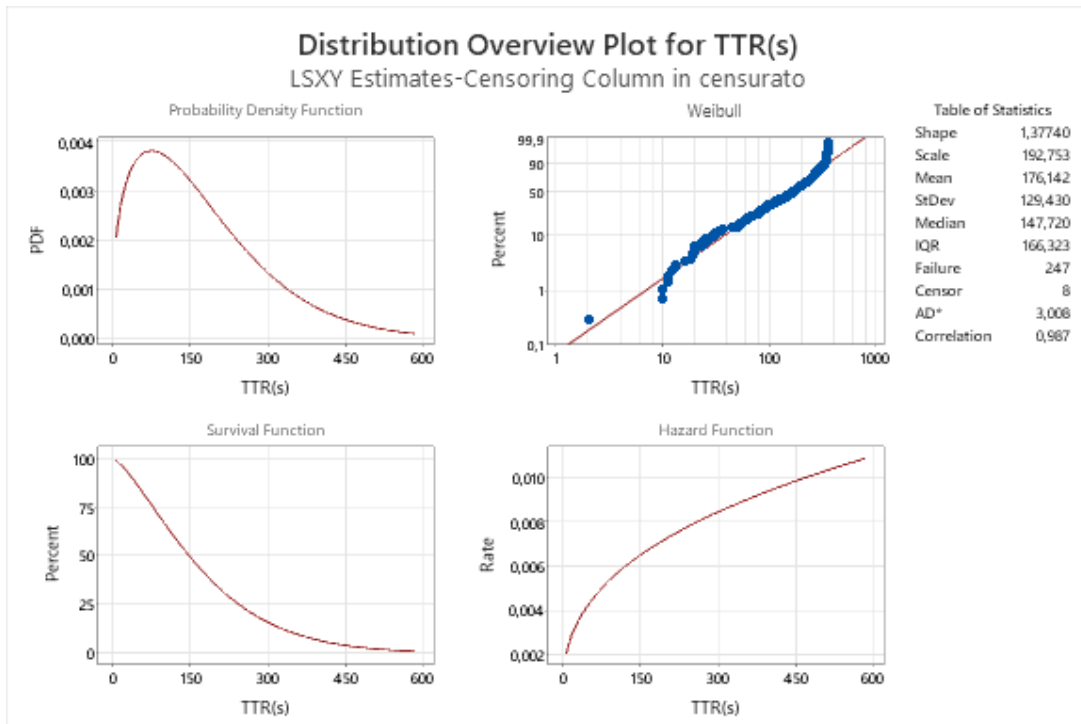


Figura 23: Distribuzione TTR etichettatrice

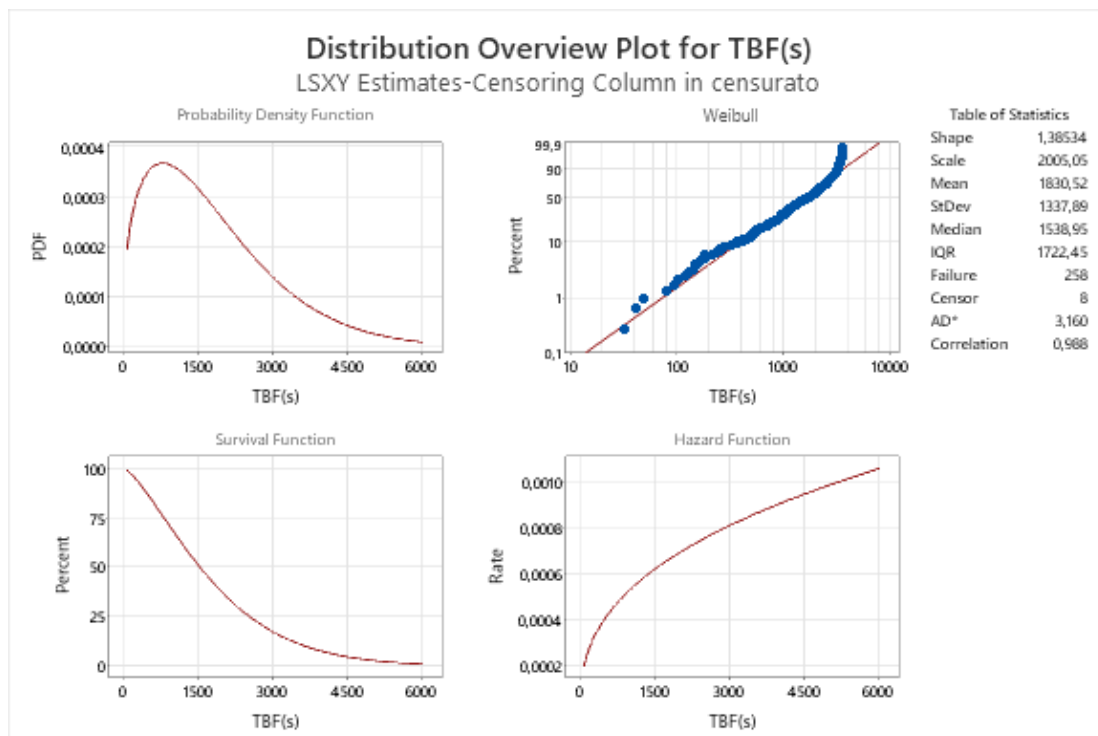


Figura 24: Distribuzione TBF Confezionatrice

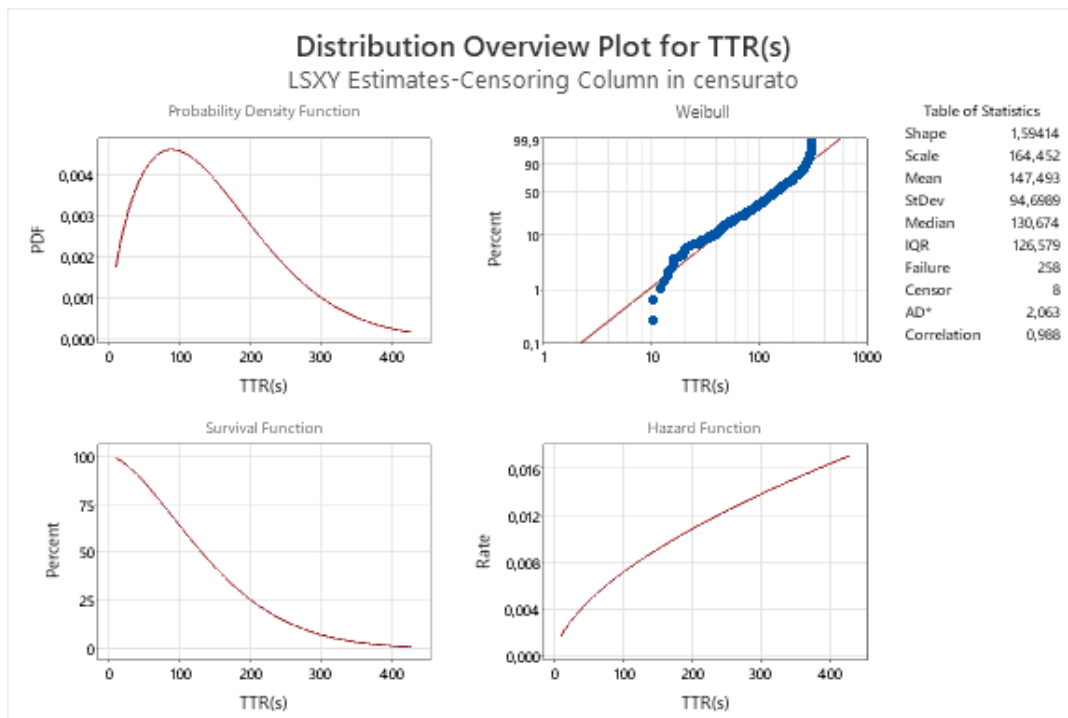


Figura 25: Distribuzione TTR Confezionatrice

Come si può vedere dai risultati, l'indice di correlazione è alto per tutte le distribuzioni e quindi i risultati sono affidabili.

Di seguito la Tabella 3 riassume i coefficienti ricavati.

Macchina	TBF			TTR		
	β	θ	r correlazione	β	θ	r correlazione
Etichettatrice	1.430180	2067.98	0.985	1.377400	192.753	0.987
Confezionatrice	1.385340	2005.05	0.988	1.594140	164.452	0.988

Tabella 4: Risultati analisi distribuzioni affidabilistiche

4.3 Simulazione

A questo punto è possibile impostare la simulazione con i dati ottenuti finora. A tal proposito verrà usato il software FlexSim®.

Gli elementi principali che utilizzeremo per questa simulazione sono quattro. Prima di tutto servirà l'elemento "Source", figura 26, il quale genera i pezzi che poi verranno lavorati dai due macchinari. È possibile generare i pezzi secondo una determinata distribuzione probabilistica oppure, come nel nostro caso, possiamo definire un intervallo fisso chiamato "Inter-Arrival Time". Nell'applicazione è stato utilizzato un *Interval-Arrival Time* di 0.1s (Figura 27).

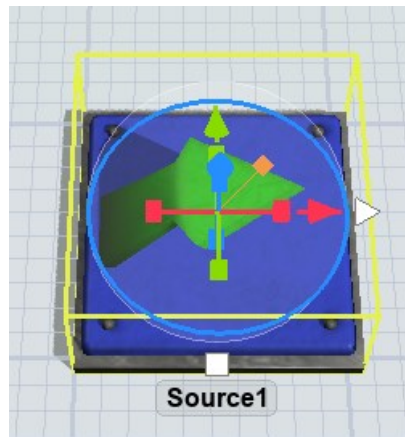


Figura 26: Source FlexSim®.

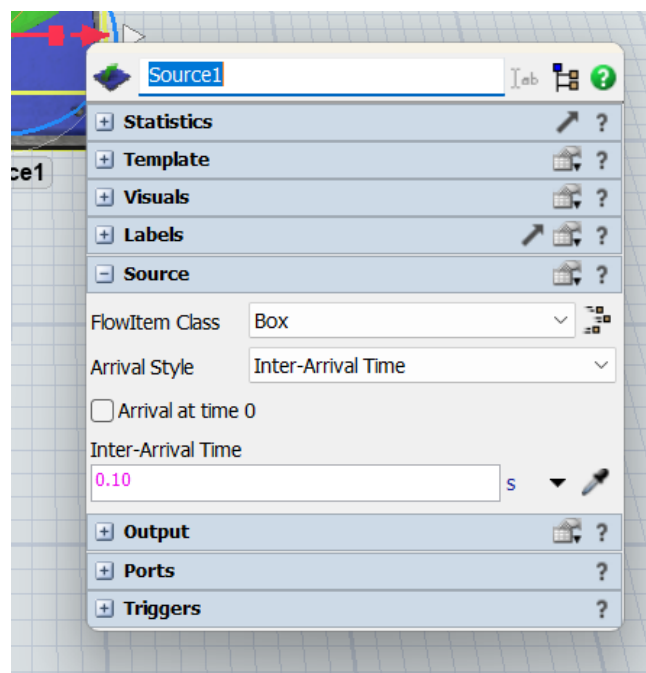


Figura 27: Dati input Source

Un altro elemento che è stato utilizzato è il “Processor”, ovvero l’elemento che lavora il pezzo generato (Figura 28). Tale elemento rappresenterà le macchine di etichettatura e Confezionamento nell’applicazione. È possibile definire la distribuzione probabilistica dei tempi di lavorazione dei pezzi, nel nostro caso è stata utilizzata la distribuzione normale con media e deviazione standard espresse in secondi come in tabella 1(Figura 29).

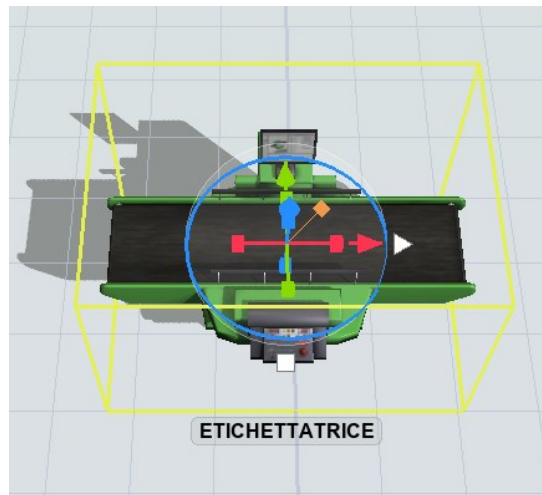


Figura 28: Processor FlexSim®.

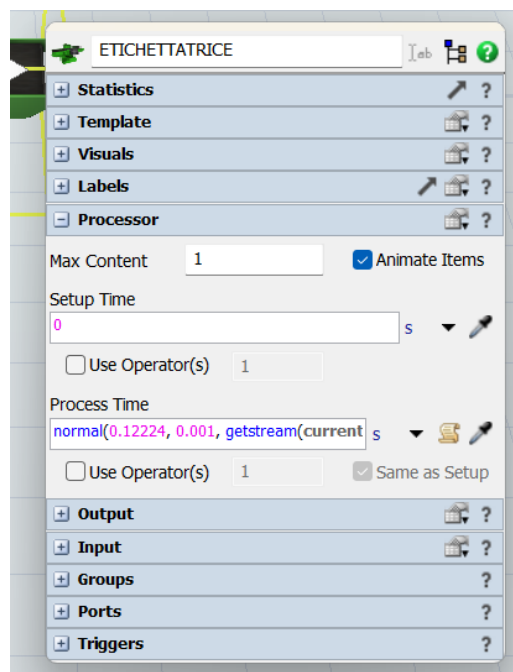


Figura 29: Dati input etichettatrice

Serve poi, ovviamente, l'elemento "Queue", a rappresentare il buffer interoperazionale. Di esso è necessario specificare la grandezza, come mostrato nelle figure 30 e 31 che seguono

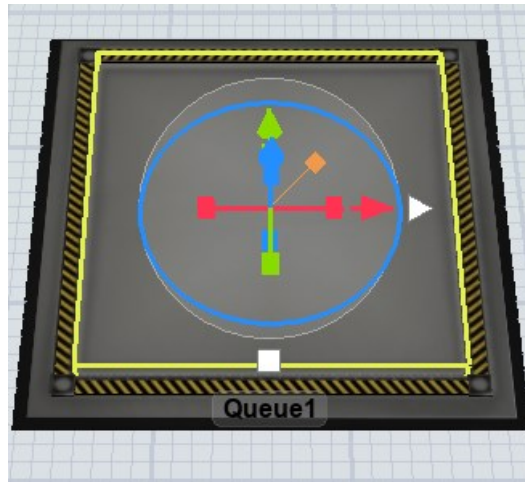


Figura 30: Queue FlexSim®.

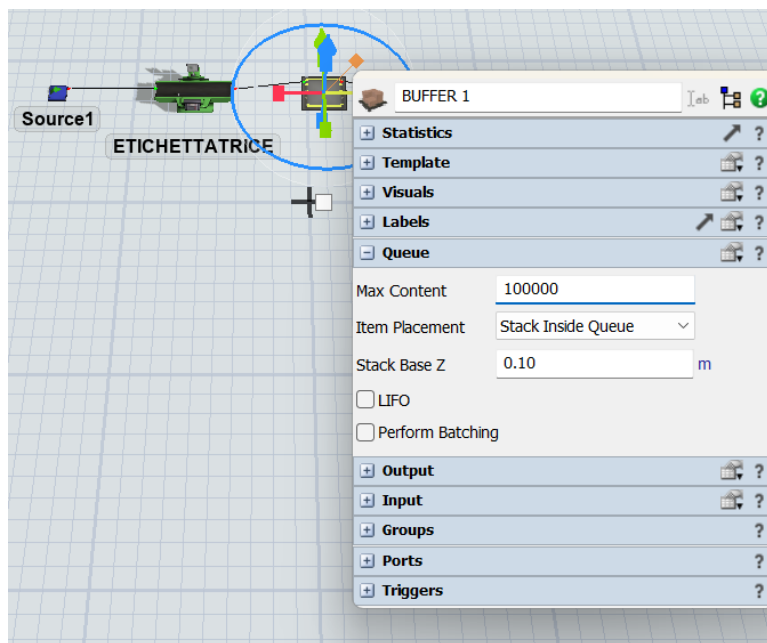


Figura 31: Dati input Buffer

E per ultimo il “Sink”, che ha lo scopo di raccogliere il prodotto lavorato in uscita dalla confezionatrice.

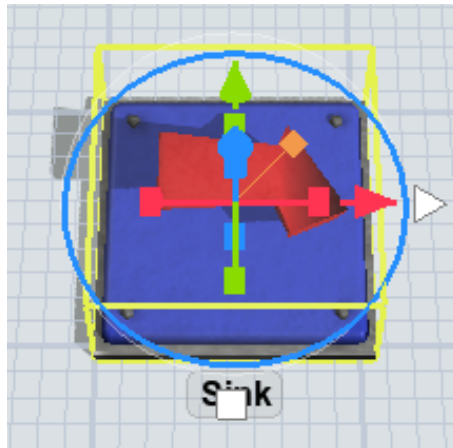


Figura 32: Sink FlexSim®.

Infine ad ogni macchina è stata associata la sua distribuzione di affidabilità (TBF e TTR) come indicato in Tabella 3, ovvero utilizzando le distribuzioni di Weibull ricavate dai dati registrati sul campo. La figura 33 riporta l'esempio dell'etichettatrice.

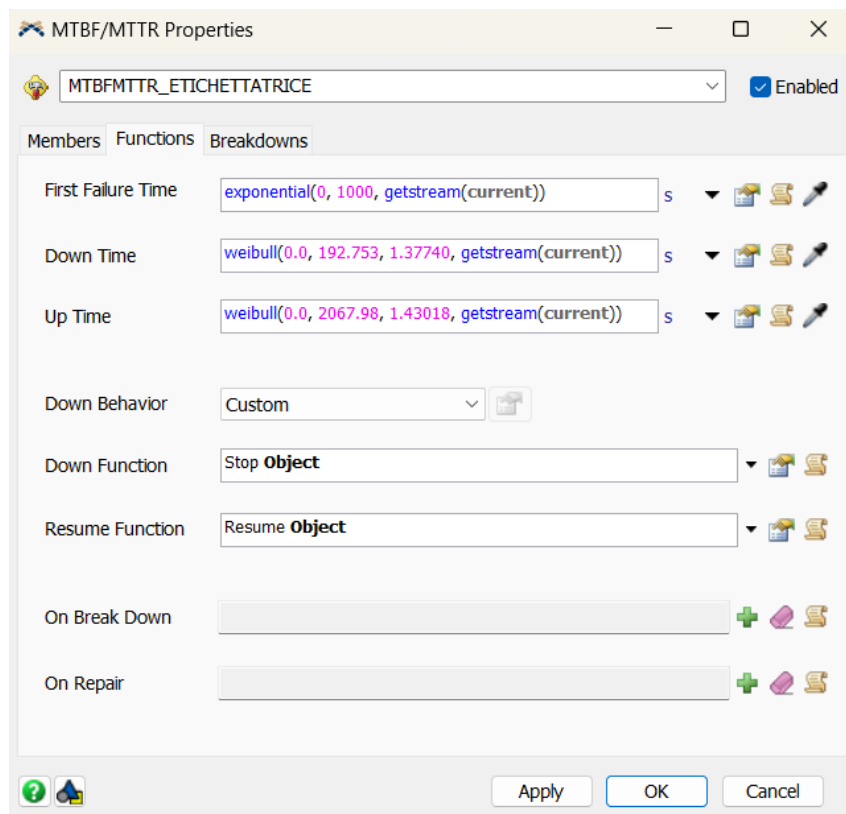


Figura 33: Distribuzioni di TBF e TTR per l'Etichettatrice

A questo punto vengono definiti i parametri valutativi. Le grandezze d'interesse da visualizzare sono:

- Il numero di pezzi accumulati nel buffer nel tempo
- L'output finale dopo due turni di lavoro
- Il coefficiente di utilizzo dei macchinari per accertarsi che rimangano al di sopra dell'80%

Al fine di individuare la dimensione ottimale del buffer, sono stati studiati i tre parametri al variare della grandezza del buffer. Le simulazioni hanno una durata di due turni lavorativi, ovvero 57'600 secondi.

Come dimensioni dei buffer sono state scelte BUFFER = 100, 1'000, 5'000, 10'000, 20'000, 25'000, 100'000.

Per le dimensioni più piccole del buffer, si nota dalla figura 34, che in alcuni punti l'accumulo di pezzi viene troncato al valore impostato. Questo mostra che lì l'impianto si sarebbe fermato e dunque che ci sarebbe stata la necessità di un "polmone" di maggiore capienza

Con BUFFER = 100 in particolare risultano coefficienti che toccano il 90% che sono sì più bassi rispetto agli altri come ci si aspettava ma potrebbero risultare comunque elevati vista la piccola dimensione. Il motivo di ciò è che sono prese in considerazione sue macchine e non l'intera linea.

Al crescere della capienza del buffer le prestazioni sono man mano migliorate infatti un maggiore spazio di accumulo materiale ha permesso che i breakdown potessero essere compensati senza portare a dei fermi impianto e quindi anche ad una diminuzione dei coefficienti di utilizzo dei macchinari e dell'output della linea.

In realtà con BUFFER = 10000 si ha un picco nelle prestazioni che verrà discusso nel prossimo paragrafo.

Raggiunto il valore BUFFER = 25000, si può osservare una saturazione degli indici di performance infatti, anche con capienza di 100'000 pezzi questi sono rimasti i medesimi. Tale fatto dimostra, come confermano anche le figure 35 e 36 sottostanti, che il numero massimo di pezzi accumulati nel buffer durante la giornata lavorativa è all'incirca, appunto, 25000 pezzi.

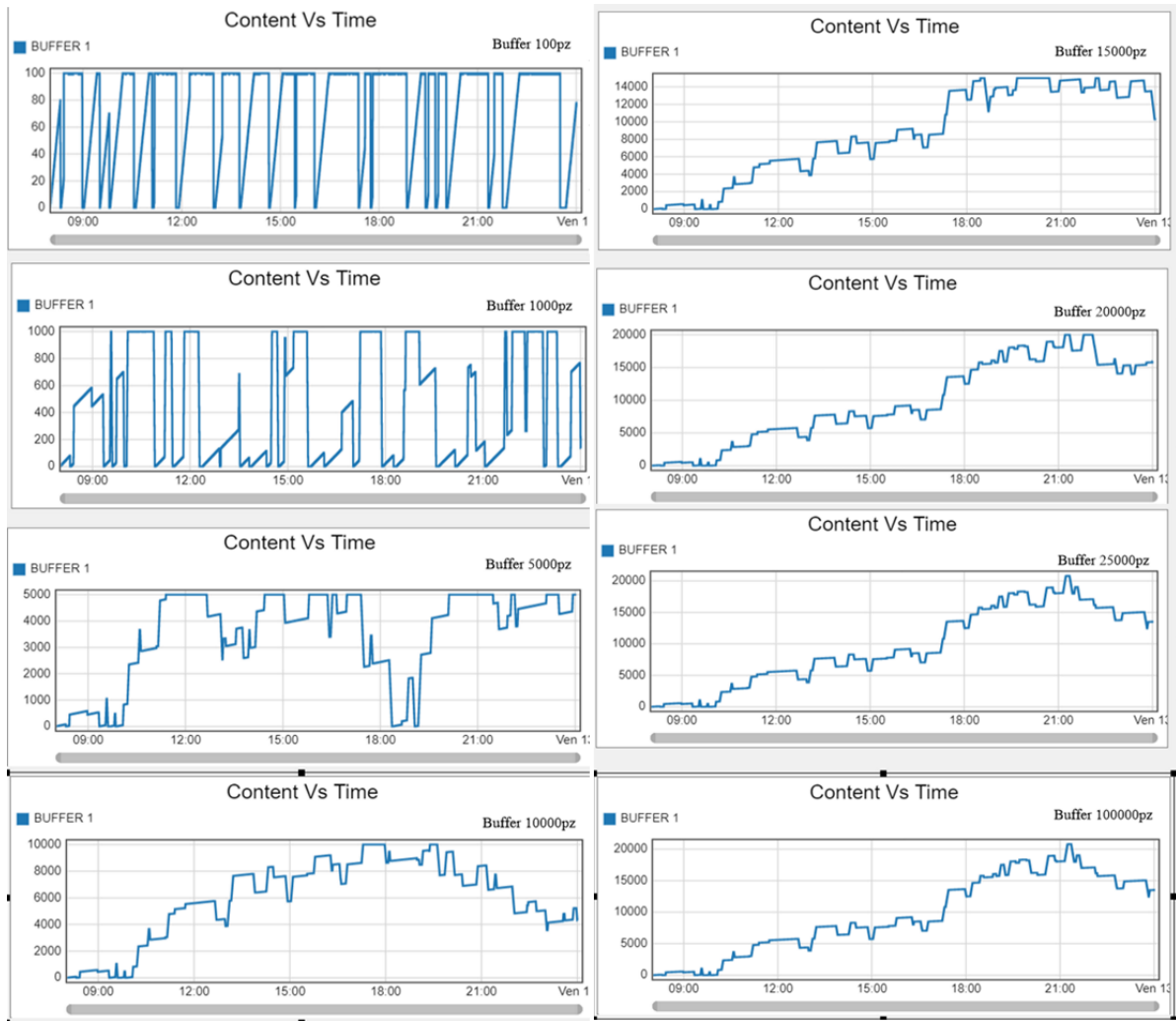


Figura 34: andamento del buffer nelle varie configurazioni

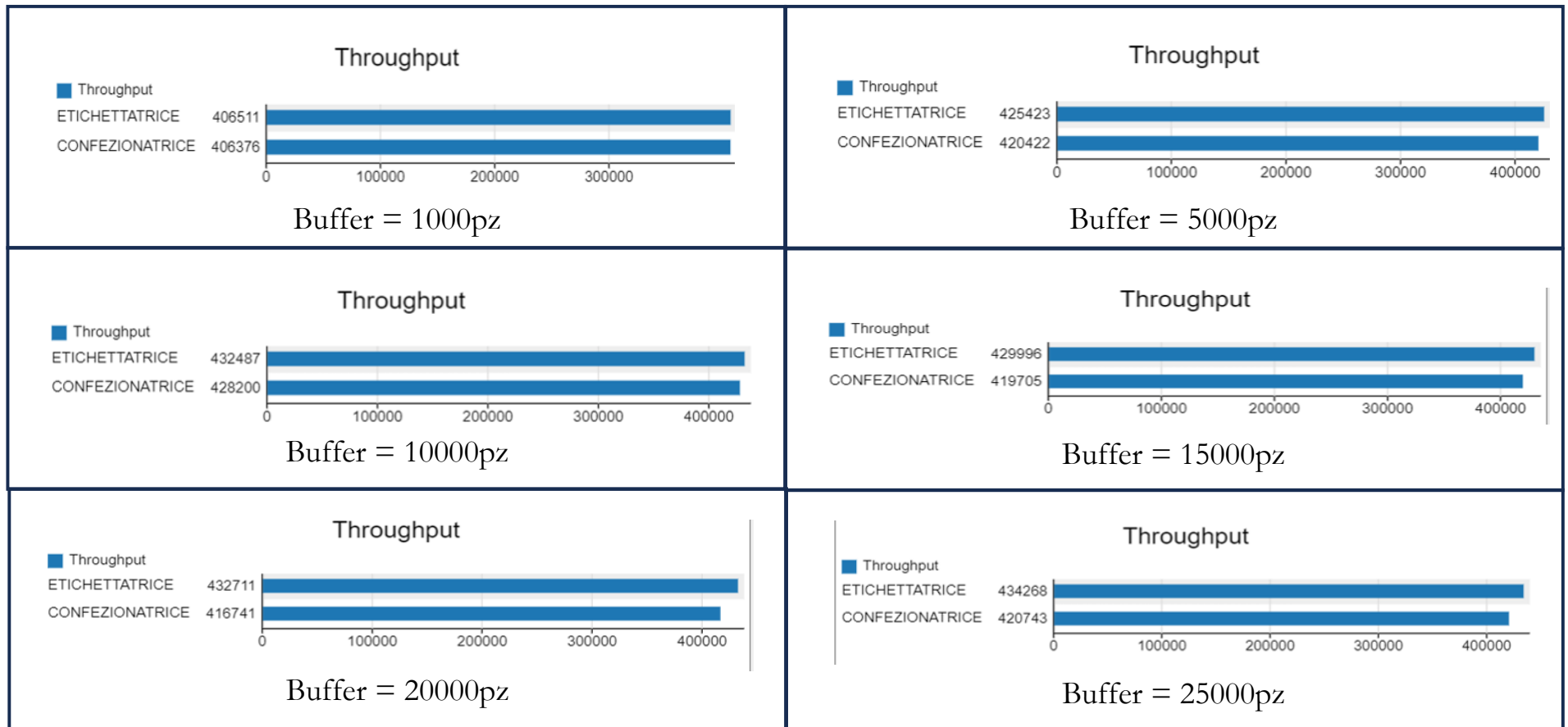


Figura 35 Throughput al variare della dimensione del buffer

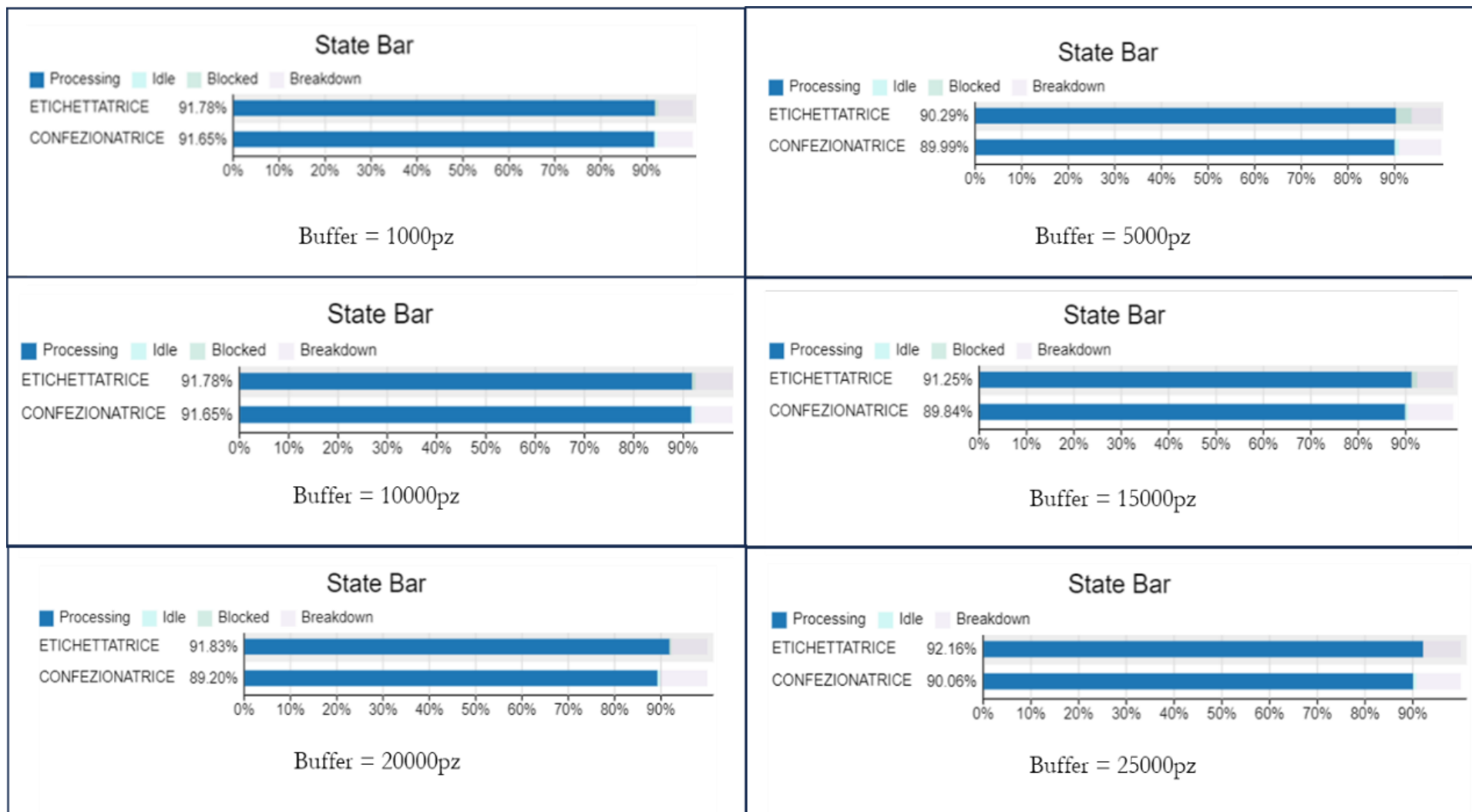


Figura 36: coefficienti di utilizzo macchinari al variare delle dimensioni del buffer

In figura 35 è possibile vedere l'output dei macchinari al variare della dimensione del buffer, mentre in figura 36 è possibile vedere come varia la % di utilizzo dei macchinari sempre al variare delle dimensioni del Buffer. In figura 36, in particolare, è possibile vedere che:

- Con colore grigio chiaro ("*Breackdown*") è indicata la porzione percentuale in termini di utilizzo del macchinario in cui quest'ultimo è fermo per via un breackdown
- Con colore azzurro chiaro ("*Idle*") è indicata la porzione in cui la macchina è in attesa (*starving*) e quindi in buffer a monte di essa è da aumentare in dimensioni
- Con colore grigio scuro ("*Blocked*") è indicata la pozione in cui una macchina è bloccata (*blocking*) e quindi il buffer a valle di essa è da aumentare in dimensioni
- Con colore azzurro intenso la porzione percentuale in cui è utilizzata regolarmente a regime

Infine è riportata una tabella riassuntiva degli indici di rendimento studiati per ciascuna dimensione del buffer considerata nella simulazione.

Buffer	% U_{etichet}	% U_{conf}	Output_{etich} $[\frac{pz}{16h}]$	Output_{conf} $[\frac{pz}{16h}]$
100	86,95	87,68	409720	409641
1000	86,27	86,98	406511	406376
5000	90,29	89,99	425423	420422
10000	91,78	91,65	432487	420200
15000	91,25	89,84	429996	419705
20000	91,83	89,20	432711	416741
25000	92,16	90,06	434268	420743
100000	92,16	90,06	434268	420743

4.3 Discussione

Come si può dedurre dalle figure riportate in precedenza, le specifiche su output orario e coefficiente di utilizzo sono rispettate per ogni dimensione impostata del buffer. Infatti i coefficienti sono sempre maggiori dell'80% e il numero di pezzi in una giornata lavorativa (che è di fatto la grandezza riportata nei grafici della simulazione), se vengono divisi per le 16 ore effettive di lavoro, restituiscono sempre output maggiori dei 25000 richiesti.

Per prima cosa è stata studiata una capienza pressoché infinita (100000 pezzi) in modo tale da poter conoscere l'andamento dell'accumulo di pezzi senza limiti.

Dopo di che, presa nota del valore massimo raggiunto (in figura 34 risulta che questo verso le ore 21.00 ed è di circa 25000 pezzi), si riduce man mano la dimensione del buffer fino al punto in cui le specifiche sull'output orario e l'efficienza non sono più verificate

A partire dalle informazioni ottenute da ciascuna di queste simulazioni, sono stati ricavati i grafici che riportano, in funzione della grandezza del buffer, l'andamento dei pezzi in uscita dalla linea considerata (e quindi in uscita dalla confezionatrice) come in figura 37 e l'andamento dell'efficienza media del sistema come in figura 38.

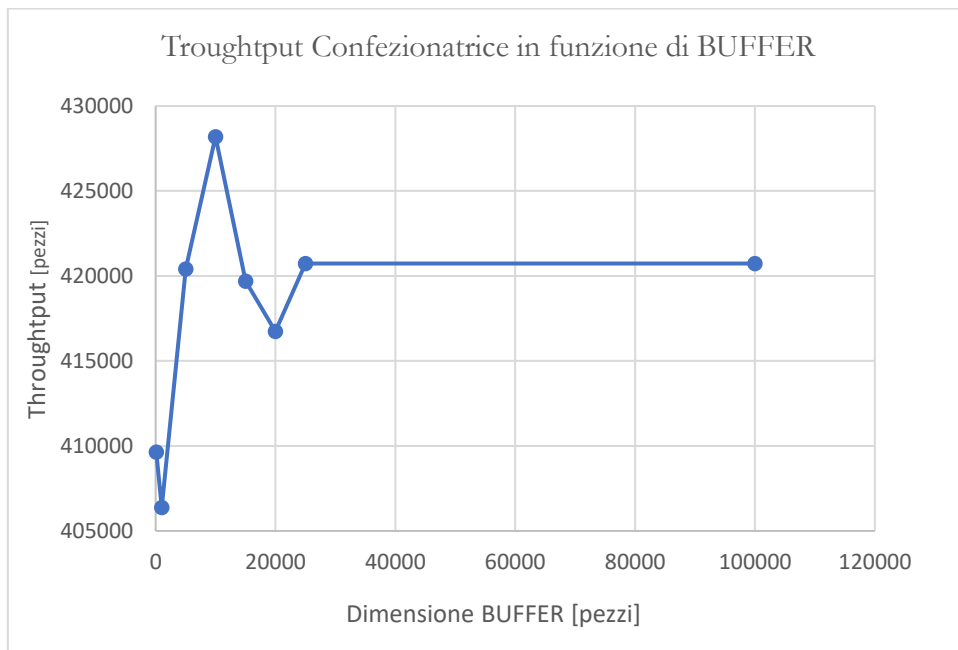


Figura 37: andamento dell'output della linea in una giornata lavorativa

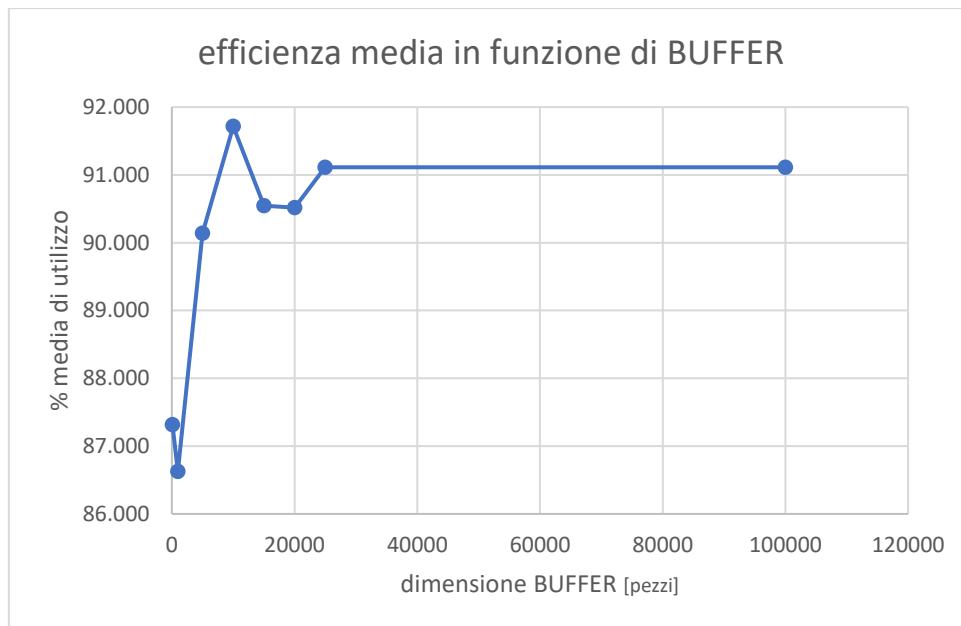


Figura 38: andamento percentuale della media degli utilizzi dei macchinari

Dai grafici è evidente un andamento a saturazione. Questo, com'è giusto che sia, è comune ad entrambi i grafici. Ciò permette quindi di dedurre che, all'aumentare della dimensione del buffer, si ha una rapida crescita iniziale nelle prestazioni fino al raggiungimento di un livello di saturazione, oltre il quale, ingrandendo anche di molto tale buffer, non si ottiene alcun miglioramento significativo.

Una prima strada è quindi quella di scegliere come dimensione ottima quella oltre la quale si raggiunge la “zona di saturazione” e quindi di circa 25000 pezzi. Tale valore è molto vicino al valore massimo di pezzi accumulati nel buffer considerando questo con capienza infinita (come visto nella figura 34) quindi è in un certo senso la soluzione più cautelativa dal momento che eviterebbe sempre blocchi del sistema, ma al contempo non la migliore dal punto di vista dei costi.

Tuttavia si può altresì notare che, poco prima del raggiungimento del valore di saturazione, vi è una sovralongazione in tutti e due i grafici. Ciò lo si poteva evincere anche dai grafici nel precedente paragrafo infatti, con BUFFER = 10000, le prestazioni del sistema raggiungono un picco nonostante la presenza assicurata di fermate in tutti i momenti della giornata lavorativa nei quali si raggiunge un accumulo superiore ai 10000 pezzi.

Questa quindi sarebbe la soluzione ideale anche dal punto di vista dei costi rispetto alla precedente, se non fosse per la sua “instabilità”. Le performance della linea, per la stessa capacità del buffer, potrebbero variare (e in particolare diminuire) anche con una piccola variazione nell'affidabilità $R(t)$ dei macchinari (e quindi dei suoi TBF e TTR) o più semplicemente considerando la linea completa (e quindi anche Raddrizzatore, Monoblocco

di Riempimento, Palletizzatore, Fasciatrice) in cui bisognerebbe considerare anche gli effetti di *starving* e *blocking* dei macchinari a valle e a monte i quali si ripercuoterebbero, se si volesse mantenere una capacità di 10000 pezzi, sulle prestazioni (salirebbe la quantità di materiale da accatastare, ma avendo a disposizione quella cifra, ne risentirebbero, appunto gli indici di performance).

Volendo quindi di aggiungere il resto delle stazioni, la soluzione con BUFFER = 25000 risponderrebbe in maniera migliore ad un maggiore accumulo di materiale distribuito nelle 16 ore lavorative.

5. Conclusioni

In questo elaborato, a seguito di un'introduzione generale sui diversi sistemi di produzione, sono state viste le principali metodologie di dimensionamento dei buffer interoperazionali industriali in linee automatizzate. Queste possono essere suddivise in metodi basati sulla valutazione delle performance, metodi basati su soluzioni esplicite, metodi di ottimizzazione integrata, metodi di ottimizzazione iterativa. Tra i precedentemente citati, è stata adottata la simulazione per dimensionare il buffer di una parte di linea composta da 2 stazioni. Essa ha lo scopo di simulare mediante un software l'andamento reale di una linea industriale e, come vantaggio rispetto agli altri metodi, è in grado di portare risultati piuttosto precisi anche per linee di grandi dimensioni e di cogliere la casualità degli eventi.

Nel caso studio è stato applicato il software FlexSim®. Prima di tutto sono stati elaborati i dati raccolti sui macchinari, riguardanti TBF e TTR, per determinare tramite il software Minitab® i parametri delle distribuzioni di Weibull della probabilità di guasto e riparazione. Successivamente è stato creato il modello simulativo con i due macchinari, Etichettatrice e Confezionatrice separate da un buffer, e inserite le interfacce di visualizzazione dei risultati (ossia andamento del buffer, throughput e efficienza dei macchinari). I risultati ottenuti hanno mostrato, anche per le più piccole dimensioni selezionate del buffer, un output del sistema e efficienze dei macchinari superiori a quelli minimi richiesti. Ciò è dovuto al fatto di non aver considerato la linea completa, in cui avrebbero influito anche le inefficienze (gli scarti in particolare) degli altri macchinari. A tal proposito si è visto come i possibili valori ottimali del buffer fossero due. Uno "ideale" di 10000 pezzi per cui si ha un picco nelle prestazioni del sistema, ma instabile al variare delle dimensioni della linea considerata e dell'affidabilità dei macchinari. E un altro più cautelativo di 25000 pezzi che garantisce in qualsiasi caso un'ottima prevenzione dalle fermate e quindi delle ottime prestazioni, ma che al contempo è più svantaggiosa dal punto di vista dei costi.

A questo punto è doverosa una considerazione sull'applicabilità di un metodo di risoluzione simulativo da parte di un'azienda di produzione. La simulazione infatti, nonostante l'esattezza dei risultati offerti e la fedeltà con cui i comportamenti reali vengono rappresentati, richiede, se si pensa al caso di una linea reale composta da molte stazioni in serie, una grande mole di dati e la competenza interna per l'utilizzo della simulazione e dei suoi risultati. Per tale ragione conseguono elevati costi di investimento, elevati tempi computazionali, necessità di una grossa base dati e necessità di personale opportunamente formato che sia in grado di

utilizzarli a dovere. Risulta quindi un metodo difficilmente impiegabile dalle piccole medie aziende. Tuttavia è largamente utilizzato dalle grandi industrie, soprattutto per la progettazione di grandi impianti molto costosi.

BIBLIOGRAFIA

Battini, D., Faccio, M., Persona, A. and Regattieri, A. (2013) *Buffer design for availability: a new simulative study in case of infant and random failures*, International Journal of Services and Operations Management, Vol. 14, No. 2, pp.157–174.

Battini, D., Persona, A. and Regattieri, A. (2009) *Buffer size design linked to reliability performance: a simulative study*, Computers and Industrial Engineering, Vol. 56, No. 4, pp.1633–1641.

Demir, L., Tunali, S. and Eliiyi, D.T. (2014) *The state of the art on buffer allocation problem: a comprehensive survey*, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 25, No. 3, pp.371–392.

Weiss, S., Schwarz, J.A. and Stolletz, R. (2019) *The buffer allocation problem in production lines: formulations, solution methods, and instances*, IISE Transactions, Vol. 51, No. 5, pp.456–485.

Zennaro, Serena Finco, Riccardo Aldrighetti and Daria Battini (2022) *Buffer size evaluation in a bottle plant production system: a comparison between different solving methods*, Int. J. Services and Operations Management, Vol. 42, No. 4, pp. 500-524.

BIBLIOGRAFIA DELLE FIGURE

Figura 1, 6, 18, 19: materiale didattico del corso Impianti Meccanici 2022/2023, UNIPD, Ingegneria Meccatronica

Figura 2, 4, 7: Bonaiti Riccardo, “*Studio e riorganizzazione del lay-out di un’azienda specializzata nella produzione di arredi industriali. Il caso Fami srl*”, pg. 6, 9, 9

Figura 5: <https://www.easylean.it/News.asp?Id=343&Nome=Cellular-Manufacturing-%96-maggiore-produttivit%E0-con-meno-sprechi>

Figura 9, 15: Battini, D., Persona, A. and Regattieri, A. (2009) ‘*Buffer size design linked to reliability performance: a simulative study*’, Computers and Industrial Engineering, Vol. 56, No. 4, pg. 1638, 1637.

Figura 11: “*Bathtub Curve*”, Wikipedia

Figura 14: “*Le catene di Markov, che cosa sono, dove si collocano nella data science*”, <https://img.ai4business.it/wp-content/uploads/2021/06/15005959/word-image-5.png.webp>

Figura 17: Spagnolo Ivan, “*Metodi di dimensionamento di un buffer interoperazionale: teoria delle code e simulazione montecarlo*”

Figura 20: Demir, L., Tunali, S. and Eliyi, D.T. (2014) ‘*The state of the art on buffer allocation problem: a comprehensive survey*’, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 25, No. 3, pp.371–392.