Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccatronica

Dimensionamento di una linea automatizzata per la produzione di crostini soggetta a micro-fermate tramite simulazione ad eventi discreti

Relatore: Prof. Nicola Berti
Correlatore: Prof.ssa Ilenia Zennaro

Laureandi:
Zanconato Alex
Furlanello Matteo
Tapparello Riccardo
Passarini Edoardo

Anno Accademico 2024/2025

Indice

Introduzione **4**

1 Classificazione degli Impianti **5**

1.1 Tipologie Produttive 5

1.1.1 Produzione in Zona 1 6

1.1.2 Produzione in Zona 2 6

1.1.3 Produzione in Zona 3 8

1.1.4 Produzione in Zona 4 8

1.2 Dimensionamento Impianto 9

1.2.1 Metodo dei calcoli diretti 9

1.2.2 Riferimenti immagini 13

2 Il Buffer **14**

2.1 Introduzione al Buffer 14

2.1.1 Problematiche legate alla linea Produttiva 15

2.2 I Buffer Interoperazionali 16

2.3 Tipologie di Buffer 16

2.4 Buffer Allocation Problem 19

2.5 Metodi di dimensionamento del buffer 19

2.5.1 Explicit Solutions Method (Soluzioni esplicite) 20

2.6 Dimensionamento del buffer con metodo del serbatoio 22

2.7 Alternativa 1 : Analisi di Buffer usando la distribuzione di Costanti di Downtime 25

2.7.1 Introduzione al Buffer 25

2.7.2 Problem scenario - generalizzazione 25

2.7.3 Metodologia 26

2.8 Riferimento immagini 28

3 Caso Studio **29**

3.1 Introduzione 29

3.2 Dati di progetto 30

3.3 Dimensionamento Linea 30
3.4 Dimensionamento Buffer "metodo del serbatoio" caso studio 33
3.4.1 Evoluzione del contenuto dei buffer durante il turno di lavoro . . . 36
3.5 Dimensionamento buffer con alternativa 1 40
3.5.1 Caso studio con 1 macchinario a valle 40
3.5.2 Caso studio con 2 macchinari a valle 41
3.6 Conlusioni relative all'alternativa 1 41

4 Simulazione **44**
4.1 Cos'è Flexim? 44
4.2 Funzioni principali usate nella simulazione 44
4.2.1 Impostazioni dei buffer 47
4.3 Inizio della simulazione 49
4.3.1 Grafici 50

5 Conclusioni **58**

Conclusioni **58**

Bibliografia **60**

Introduzione

Nell'ambito della produzione industriale, la corretta progettazione delle linee di assemblaggio riveste un ruolo cruciale per garantire l'efficienza, la continuità del flusso produttivo e l'ottimizzazione delle risorse. In particolare, il dimensionamento dei buffer, ovvero le aree o i dispositivi destinati all'accumulo temporaneo di prodotti tra due stazioni successive, rappresenta un elemento determinante per il bilanciamento della linea, la riduzione dei tempi di inattività e il miglioramento delle prestazioni complessive dell'impianto. Le linee di produzione possono essere classificate in due principali categorie: sincrone e asincrone. Le linee sincrone sono caratterizzate da stazioni operative che lavorano in modo coordinato e simultaneo: ogni fase del processo avanza allo stesso ritmo e un'eventuale fermata di una stazione si ripercuote sull'intera linea. Al contrario, nelle linee asincrone, ogni stazione opera in modo indipendente, con la presenza di buffer intermedi che permettono di assorbire le variazioni di tempo tra le diverse fasi, rendendo il sistema più flessibile e resiliente a rallentamenti o guasti locali. In questo contesto, il buffer assume un ruolo fondamentale nelle linee asincrone, in quanto consente di disaccoppiare parzialmente le stazioni e garantire una maggiore continuità produttiva. Tuttavia, il suo dimensionamento non è banale: un buffer troppo piccolo può causare blocchi o interruzioni, mentre un sovradimensionamento dello stesso comporta sprechi di spazio e risorse (es: costi di gestione, operatività e di manutenzione). Tradizionalmente, il dimensionamento dei buffer viene effettuato tramite metodi analitici, basati su modelli matematici e semplificazioni dei processi reali. Sebbene tali metodi siano utili per fornire stime iniziali, spesso non riescono a cogliere la complessità e la variabilità dinamica tipiche degli impianti produttivi moderni. Per questo motivo, si stanno sempre più diffondendo strumenti di simulazione avanzata, come ad esempio il software simulativo FlexSim, che permettono di modellare con precisione il comportamento di un sistema produttivo e di valutarne le prestazioni in scenari realistici. L'obiettivo di questa tesi è confrontare due approcci al dimensionamento dei buffer in un impianto per la produzione di crostini: uno basato su una modellazione analitica tradizionale, l'altro su una simulazione dinamica realizzata tramite Flexsim Attraverso un'analisi comparativa, si intende dimostrare quali dei due approcci ottimizza lo spazio richiesto dal buffer tra due stadi produttivi di una linea asincrona.

Capitolo 1

Classificazione degli Impianti

1.1 Tipologie Produttive

Il principale diagramma di riferimento per descrivere le caratteristiche distintive tra i diversi tipi di produzione è il diagramma P–Q. In tale diagramma:

- **P (Product Variety)** rappresenta la varietà di prodotti che l'impianto è chiamato a realizzare.
- **Q (Quantity)** indica il volume produttivo associato a ciascun prodotto.

Nel caso in esame, la varietà di prodotto è ridotta, poiché si considera una sola tipologia di crostini, mentre il volume produttivo risulta elevato.
Per la costruzione del diagramma, i prodotti vengono ordinati in funzione del volume produttivo decrescente, permettendo di visualizzare il grado di standardizzazione e la scala della produzione. Il posizionamento dell'impianto nel diagramma P–Q fornisce indicazioni utili per la scelta dell'organizzazione produttiva, della tipologia di impianto e del layout più idoneo.

Di seguito è riportato il diagramma di riferimento:

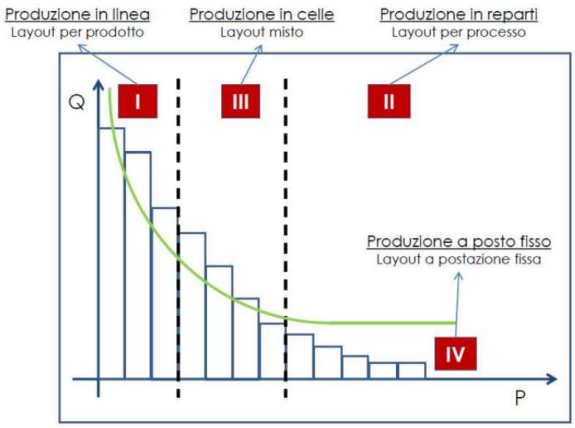

Figura 1.1: Diagramma P-Q per la definizione delle zone produttive di un impianto

come si nota dalla figura 1.1 si possono individuare quattro zone produttive differenti:

1. Zona 1 : Produzione di Linea (Layout per prodotto)
2. Zona 2 : Produzione in Reparti (Layout per processo/reparto)
3. Zona 3 : Produzione in celle (Layout misto)
4. Zona 4 : Produzione a posto fisso (Layout a postazione fissa)

1.1.1 Produzione in Zona 1

La produzione in linea si contraddistingue per una bassa varietà di articoli (spesso si tratta di un prodotto unico) e per elevati volumi produttivi. Il layout impiantistico risulta estremamente trasparente, in quanto l'organizzazione delle macchine segue fedelmente il ciclo tecnologico del prodotto.
I percorsi dei materiali sono generalmente unidirezionali e lineari: ogni prodotto, una volta lavorato da una macchina, viene trasferito direttamente alla successiva. Questo schema comporta una ridotta movimentazione interna, con trasporti rigidi e automatizzati, ottimizzati per la sequenzialità della produzione (Nel caso studio analizzato in questo elaborato i processi sono: "Impastamento,Formatura,Lievitazione,Cottura,Confezionamento, Sigillatura,Inscatolamento").
Le attrezzature utilizzate sono altamente specializzate, progettate specificamente per il tipo di prodotto trattato, e richiedono una manodopera poco specializzata, impiegata prevalentemente in attività di supervisione e controllo.
In questo contesto, i livelli di **WIP (Work In Progress)**risultano contenuti e il coefficiente di utilizzo U degli impianti è tipicamente elevato, con valori che si attestano attorno all'80–90 %.

$$U = \frac{\text{tempo di effettivo utilizzo}}{\text{tempo di utilizzo}}$$

In Figura 1.2 è rappresentato un esempio di un impianto automatizzato in linea (Zona 1) di un'azienda che produce croissant.

1.1.2 Produzione in Zona 2

La produzione in **Zona 2** è tipicamente caratterizzata da un'elevata varietà di prodotti associata a bassi volumi produttivi per ciascuna referenza. In questa configurazione, il layout dell'impianto non è trasparente, poiché le risorse sono organizzate per reparti funzionali, e non seguono una sequenza produttiva lineare.

Figura 1.2: Linea automatizzata per la produzione di Croissant

I macchinari impiegati sono **versatili e generici**, progettati per poter eseguire diverse operazioni su prodotti differenti. A tal fine, è richiesta una manodopera altamente specializzata, capace di gestire lavorazioni complesse e variabili.
La presenza di cicli tecnologici eterogenei rende difficoltosa l'implementazione di linee di produzione dedicate. Di conseguenza, *il grado di automazione è contenuto*, mentre le movimentazioni dei materiali sono generalmente manuali e flessibili. Gli spazi operativi risultano meno razionalizzati, in quanto è necessario prevedere aree più ampie per consentire la manovrabilità dei pezzi e la presenza degli operatori.
Il livello di WIP tende ad essere elevato, proprio per effetto della disomogeneità dei lotti e della difficoltà di sincronizzazione tra le lavorazioni. Anche il coefficiente di **utilizzo U** delle risorse risulta basso (intorno al 40%), a causa dei frequenti set-up richiesti per il passaggio da un prodotto all'altro.
In Figura 1.3 viene riportato un prototipo di layout aziendale tipico di un'azienda che lavora in Zona 2.

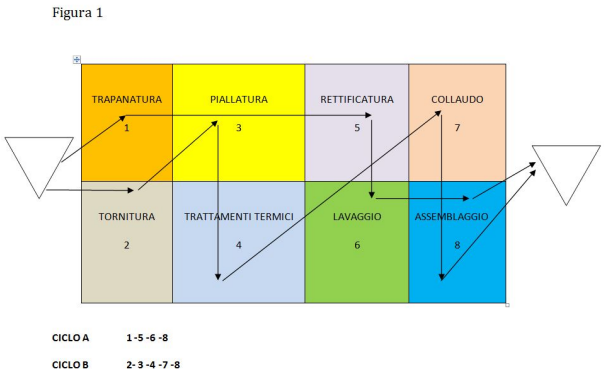

Figura 1.3: Produzione per reparti

1.1.3 Produzione in Zona 3

La **zona di transizione** si colloca tra la produzione in linea (Zona 1) e quella per reparti (Zona 2), presentando caratteristiche intermedie sia in termini di varietà di prodotti che di volumi produttivi.
In questa configurazione viene solitamente adottato un **layout misto o a celle di produzione**, in cui le macchine sono organizzate per famiglie di prodotto. La definizione di tali famiglie è supportata dall'approccio della **Group Technology (GT)**, un insieme di metodologie che consente di raggruppare i prodotti in classi omogenee sulla base di caratteristiche costruttive e/o tecnologiche comuni.
L'obiettivo principale della GT è quello di conciliare la flessibilità tipica della Zona 2 con i vantaggi in termini di efficienza e produttività della Zona 1. In questo modo, si ottiene una soluzione di compromesso che permette di adattare la produzione a una gamma moderata di prodotti, mantenendo al tempo stesso un buon livello di standardizzazione e un uso più efficiente delle risorse.

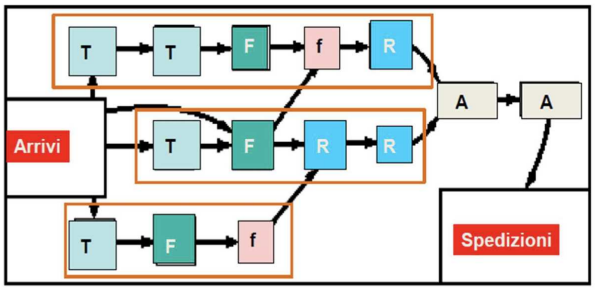

Figura 1.4: Produzione per Celle

1.1.4 Produzione in Zona 4

La **produzione su commessa** si concentra tipicamente sulla realizzazione di prodotti di grandi dimensioni, fortemente personalizzati e spesso unici, o comunque fabbricati in quantità estremamente limitate. Questo tipo di produzione è caratterizzato da un'elevata varietà e da cicli produttivi specifici per ciascun ordine.
Il layout impiegato è generalmente a **postazione fissa**, in cui è il prodotto a rimanere statico, mentre le risorse produttive – manodopera e attrezzature – si spostano intorno ad esso. Questa configurazione è tipica di settori come *l'edilizia*, la *cantieristica navale* e *l'industria aeronautica*, dove la natura stessa del prodotto rende impraticabile il suo spostamento.

Un elemento distintivo della produzione su commessa è il forte coinvolgimento dell'operatore, che può avvenire attraverso due principali approcci organizzativi:

1. **Job Enrichment**:Estensione verticale del lavoro, l'operatore esegue interamente una parte del progetto con aumento di responsabilità.

2. **Job Enlargment** :Estensione orizzontale del lavoro, l'operatore esegue piu lavorazioni ma con la stessa responsabilità

Tra i principali vantaggi di questo tipo di produzione vi è la capacità di adattare il processo alle specifiche esigenze del cliente, permettendo una personalizzazione spinta anche su scala ridotta. Questo rende la produzione su commessa particolarmente adatta a contesti in cui la flessibilità e la personalizzazione sono requisiti chiave.
La Figura 1.5 rappresenta un esempio di azienda che opera in Zona 4 nel settore navale.

Figura 1.5: Produzione su commessa

1.2 Dimensionamento Impianto

1.2.1 Metodo dei calcoli diretti

Tra i metodi di dimensionamento più diffusi per gli impianti produttivi si annovera il **metodo dei calcoli diretti**, apprezzato per la sua semplicità operativa e per la capacità di fornire stime affidabili in tempi contenuti. L'obiettivo principale di questo approccio è la determinazione delle **capacità produttive** per ciascuno stadio di lavorazione, espresse in **pezzi all'ora Q [pz/h] (*l'unità di misura può essere espressa anche in pz/g o pz/mese a seconda della produttività richiesta per i prodotti che l'azienda produce*)**. Con il termine "stadio" si fa riferimento a una fase specifica del ciclo tecnologico a cui è sottoposto il prodotto durante il suo processo di trasformazione.
Una volta calcolata la **capacità produttiva** per ciascuno stadio, si procede con la determinazione del **numero di macchine** necessarie per garantirne il raggiungimento. Questa analisi permette, infine, di stimare il fabbisogno complessivo di macchinari a livello im-

piantistico.

A tal fine, si prende in esame uno stadio generico "j" per il quale si definisce:

1. Qj = la portata in ingresso allo stadio;
2. Quj = la portata in uscita dallo stadio

Per procedere a un corretto dimensionamento, è necessario considerare alcuni coefficienti correttivi, che tengono conto di variabili reali come disponibilità, efficienza e perdite di processo. I principali coefficienti sono:

1. K1 = **Coefficiente di scarto** esso viene calcolato considerando la percentuale di diffettosità associata a ciascun stadio;

$$Quj = Qj - sj = Qj - PjQJ = Qj(1 - Pj) = QjK1$$

dove Pj rappresenta la percentuale di Scarto.

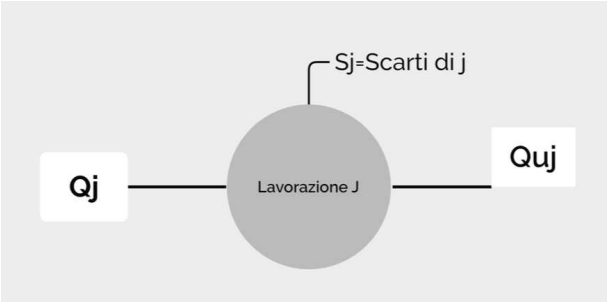

Figura 1.6: Determinazione dello scarto produttivo per uno stadio generico "j"

2. K2 = **Coefficiente di Disponibilità**
   Questo coefficiente permette di determinare l'impatto della disponibilità del macchinario sulla potenzialità produttiva dello stadio.

$$K_2 = \frac{UPTIME}{UPTIME + DOWNTIME}$$

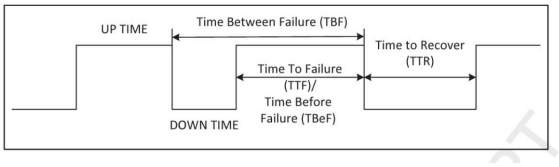

Figura 1.7: Stato di Up Time e di Down Time

3. K3 = **Coefficiente di Efficienza dell'operatore**
   Il coefficiente K3 permette di determinare l'impatto della manodopera sulla potenzialità produttiva. Questo coefficiente considera l'efficienza degli operatori durante la giornata con un valore medio che include le pause fisiologiche e per le soste programmate. K3 assume dei valori quasi unitari per gli impianti automatizzati in Zona 1 in quanto la presenza dell'operatore in questa zona è meno rilevante rispetto alla Zona 2, in cui la manodopera assume un ruolo fondamentale e spesso influisce sulle performance in caso di assenza momentanea della forza lavoro.

4. K4 = **Coefficiente di Utilizzo**
   Nel calcolo di questo coefficiente, il denominatore rappresenta il tempo di disponibilità dello stadio, mentre il numeratore si riferisce al **Production Time** cioè al tempo effettivo della produzione senza interruzioni.

$$K4 = \frac{PRODUCTIONTIME}{UPTIME}$$

   Si evince che il **Production Time** è inferiore rispetto al **Uptime** perchè tiene conto della presenza di tempi di attrezzaggio (set-up) tra lotti differenti e di microfermate dei macchinari.

Quindi la formula per il dimensionamento delle potenzialità di stadio in fine è:

$$Qj = \frac{Quj}{(K1K2K3K4)j} = \frac{Quj}{\eta j}$$

con ηj definito come " rendimento dello stadio j".
Nel caso di una **Linea Sincrona** la potenzialità dello stadio j risulta pari a :

$$Q_j = \frac{Q_{j+1}}{\eta_j} = \frac{Q_{j+1}}{(\prod_{i=1}^{4} k_i)_j}$$

nel caso di **Linea Asincrona:**

$$Q_j = \frac{Q_u/(\prod_{s=j+1}^{n}(K_1)_s)}{\eta_j} = \frac{Q_u/(\prod_{s=j+1}^{n}(K_1)_s)}{(\prod_{i=1}^{4} k_i)_j}$$

conoscendo tj (tempo di lavoro di un pezzo nella macchina j (min/pezzo) e la potenzialità di Qj (Pz/h) , è possibile calcolare il **numero di macchine ideali** ($\eta' j$) per lo stadio e successivamente il**numero di macchine che realmente devono lavorare** (ηj) in esso per garantire la potenzialità produttiva richiesta nel primo step del processo di dimensionamento.

$$n'_j = \frac{Q_j \cdot t_j}{60}$$

$$n_j = \lceil n'_j \rceil$$

si possono calcolare i coefficienti di **Utilizzo Teorico** (Utj) e **Reale** (Urj) dello stadio **j-esimo**.

$$U_{t,j} = \frac{n'_j}{n_j} \quad U_{r,j} = U_{t,j} \cdot K_{4,j}$$

per quanto riguarda invece il **Coefficiente di utilizzo teorico e reale della linea**:

$$U_{t,linea} = \frac{\sum_{j=1}^{n} U_{t,j} \cdot n_j}{\sum_{j=1}^{n} n_j} \quad U_{r,linea} = \frac{\sum_{j=1}^{n} U_{r,j} \cdot n_j}{\sum_{j=1}^{n} n_j}$$

1.2.2 Riferimenti immagini

1. figura 1.3, https://tesi.univpm.it/retrieve/1f59ce74-83a7-4551 -9977-e12f6b4dc182/GroupCellulare.pdf

2. Figura 1.4, https://tecnicodiproduzione.wordpress.com/2015/10/07/produzione-reparti-o-job-shop/

3. Figura 1.5, https://www.mangustayachts.com/it/about/i-cantieri-mangusta/

Capitolo 2

Il Buffer

2.1 Introduzione al Buffer

In un impianto industriale, il Buffer è una componente estremamente importante, agisce come una misura di sicurezza tra due macchine consecutive, accumulando pezzi o materiali (nel caso di studio: crostini), mettendoli a disposizione anche nel momento in cui si verificano piccoli rallentamenti o guasti temporanei.

Riportabile ad una "riserva" che assorbe le fluttuazioni dovute a microinterruzioni: quando una stazione si blocca per qualche istante, il buffer fornisce materiali alla successiva, mentre quando la stazione si riprende, il buffer torna a riempirsi nuovamente senza rallentare l'intera linea.

In questo modo le macchine lavorano in modo più uniforme e l'effetto a catena che un singolo malfunzionamento potrebbe causare a cascata viene **significativamente attenuato**.
Inoltre, la capacità di un buffer non deve essere vista solo in termini di volume di stoccaggio, ma soprattutto come strumento di **stabilizzazione del processo**.
Per questo il buffer è sempre studiato in modo da essere sincronizzato con le aree di lavoro tra cui è interposto, in modo da avere il minimo impatto possibile sul flusso dell'impianto.

Un buffer correttamente dimensionato oltre a permettere un'efficiente gestione degli spazi disponibili, permette di isolare le prestazioni delle singole stazioni dai disturbi locali nella linea, mantenendo costante il flusso produttivo e riducendo i tempi morti.
Questo migliora l'affidabilità complessiva dell'impianto e rende anche più semplice la pianificazione di interventi di manutenzione o la gestione di variazioni improvvise nella domanda, senza dover fermare l'intera linea.

*È importante sottolineare che il buffer ha la funzione di compensare le inefficienze legate ai coefficienti **K2,K3,K4** attenuando gli effetti negativi di fermate, inattività o lentezze. Tuttavia, non è in grado di compensare gli scarti di produzione rappresentati dal coefficiente **K1**poiché il materiale difettoso non può essere utilizzato nei successivi stadi produttivi, e quindi non può essere "tamponato" tramite accumulo.*

Per la determinazione delle dimensioni ottimali del buffer, e per rendere la linea flessibile ed efficiente, si usano modelli sperimentali su cui vengono basate simulazioni che tengano conto di un'ampia varietà di fattori.
L'adozione di software simulativi permette all'azienda di verificare e validare il dimensionamento effettuato con modelli analitici per determinare in modo ottimizzato le dimensioni corrette dei buffer da porre tra i vari stadi produttivi, ottimizzando anche il costo di progettazione e implementazione della linea.

2.1.1 Problematiche legate alla linea Produttiva

Fenomeno del Blocking

Si consideri una linea produttiva costituita da due macchine consecutive: **M1** (a monte) e **M2** (a valle).
In tale configurazione può verificarsi un'interruzione operativa nella macchina a valle (M2), ad esempio a causa di un guasto temporaneo. Durante il tempo di ripristino (**TTR**, *Time To Repair*), la macchina **M2** non è in grado di ricevere ed elaborare i pezzi provenienti da **M1**.

Nel frattempo, **M1** continua inizialmente a produrre; tuttavia, in assenza di uno spazio disponibile per l'accumulo (buffer), i pezzi lavorati non possono essere trasferiti a valle e iniziano ad accumularsi all'uscita di **M1**. Quando l'accumulo raggiunge la capacità massima consentita dalla dimensione del buffer a valle di **M1**, la macchina **M1** è costretta ad **arrestare la produzione**, poiché non ha più dove depositare i pezzi in uscita.
Questo fenomeno è noto come **blocking**: la macchina a **monte è bloccata** a causa dell'indisponibilità della macchina a valle, **nonostante essa stessa sia perfettamente funzionante**.
Il blocking rappresenta una delle principali cause di inefficienza nelle linee asincrone prive di buffer adeguati.

Fenomeno del Starving

Può verificarsi anche la situazione opposta: la macchina **M1 (a monte)** subisce un **guasto**, mentre la macchina **M2 (a valle)** risulta pienamente operativa.
Durante il tempo di *riparazione (TTR)*, M1 non è in grado di produrre alcun pezzo, e di

conseguenza nessun prodotto viene alimentato a M2. In questa condizione, M2 rimane priva di materiale da lavorare, pur essendo tecnicamente funzionante.

Questo fenomeno è noto come **starving**: la macchina a valle risulta *"affamata"* in quanto non riceve input dal processo a monte. Anche in questo caso, *l'effetto è un fermo produttivo*, con un impatto negativo sull'efficienza dell'intera linea.

Sia il blocking che lo starving generano situazioni di stallo che compromettono il rendimento del sistema produttivo. Per mitigare questi eventi critici, una delle soluzioni più efficaci consiste nell'**introduzione di buffer interoperazionali**, ovvero spazi di accumulo intermedi tra le diverse macchine o stazioni di lavoro. Questi buffer consentono di disaccoppiare parzialmente le operazioni tra le stazioni, offrendo una maggiore resilienza alle microinterruzioni e migliorando la continuità del flusso produttivo.

2.2 I Buffer Interoperazionali

Come annunciato fino ad ora, i **Buffer** sono considerati dei **Depositi a capacità variabile**, dove i semilavorati delle macchine precedenti vengono lasiati in attesa per essere poi lavorati nelle macchine che successive.
La funzione più rilevante è quella di disaccoppiare gli stadi di una linea produttiva e facendo in modo di rendergli autonomi tra di loro.
Nel nostro caso studio, (impianto situato in zona 1) esistono due principali tipologie di linee produttive:

- **Linee asincrone** : Linee produttive che presentano buffer che disaccoppiano due stadi adiacenti (nostro caso studio)
- **Linee sincrone** : Linee produttive con stadi adiacenti direttamente connessi fra di loro influenzandosi l'uno con l'altro

2.3 Tipologie di Buffer

Nelle linee produttive ci possono essere molte tipologie e forme di Buffer, i principali sono:

- **Buffer a nastro trasportatore**: è la tipologia più utilizzata ed essi consistono in dei nastri posizionati fra diverse stazioni di lavoro o fasi del processo produttivo. I materiali vengono spostati su di esso garantendo un flusso costante, utilizzati sopratutto quando i v*olumi dei semilavorati è alto* (figura 2.1).

Figura 2.1: Nastro trasportatore

- **Tavola Rotante**: è una piattaforma circolare che ruota costantemente consentendo ai macchinari di prelevare o depositare i materiali in modo sincronizzato. Utilizzata sopratutto quando vi è la *necessità di ridurre al minimo i tempi di innattività e quindi massimizzare la produttività* (Figura 2.2).

Figura 2.2: Tavola rotante

- **Buffer a pallet**: I pallet (o tavole) sono piattaforme di forma rettangolare o quadrata, impiegate per il movimentazione, stoccaggio e trasporto di materiali o semilavorati all'interno di un impianto produttivo o logistico. La loro funzione principale è quella di **supportare i prodotti durante le fasi di attesa, trasporto o lavorazione**.

  Grazie alla loro struttura standardizzata, i pallet possono essere agevolmente movimentati mediante sistemi automatici (trasportatori, navette, AGV) o manuali (carrelli elevatori, transpallet), garantendo efficienza, ordine e sicurezza nei flussi interni di produzione (Figura 2.3).

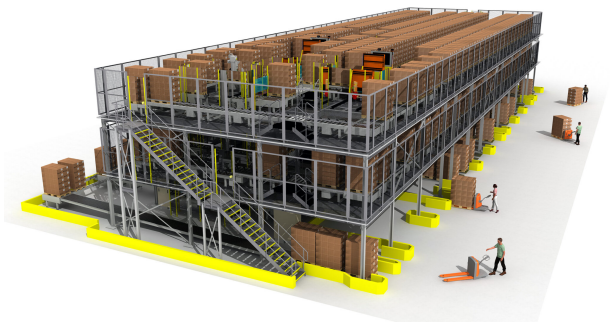

Figura 2.3: Buffer a Pallet

- **Buffer di accumulo a tavola Vibrante** : Questi buffer interoperazionali fanno uso di tavole vibranti o piattaforme motorizzate che permettono l'accumulo temporaneo di materiali o prodotti tra due stazioni consecutive del processo produttivo. La loro funzione è quella di **stabilizzare il flusso di produzione, assorbendo eventuali microfermi o sbilanciamenti tra le macchine a monte e a valle**.

  Tali sistemi di buffer trovano applicazione in numerosi settori industriali, tra cui la produzione di confezioni, la lavorazione dei materiali e l'industria alimentare, dove garantiscono continuità operativa, riduzione dei tempi morti e un migliore bilanciamento della linea (Figura 2.4).

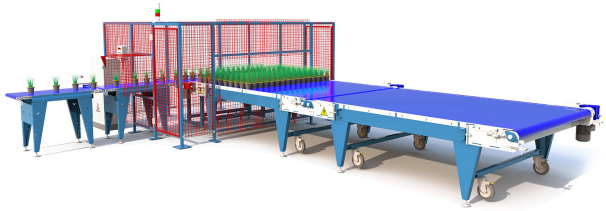

Figura 2.4: Buffer a Tavola vibrante

- **Buffer a ganci aereo**: sopratutto utilizzata nella produzione automobilistica, dove i prodotti vengono appesi tramite dei ganci che trasportano i semilavorati da una parte all'altra (Figura 2.5).

Figura 2.5: Buffer a Ganci aerei

2.4 Buffer Allocation Problem

Il **Buffer Allocation Problem (BAP)** rappresenta un tema ampiamente studiato e ancora oggi oggetto di numerosi approfondimenti, l'obiettivo principale del problema è determinare **il numero** e la **capacità ottimale dei buffer** da inserire in una linea produttiva, in modo da **massimizzare l'efficienza del sistema** e garantire il raggiungimento della produttività giornaliera prefissata.
Poiché i buffer rappresentano investimenti infrastrutturali significativi, i vari approcci proposti mirano anche a *minimizzarne l'ingombro fisico e i costi associati, mantenendo comunque elevati livelli di performance.*

Gran parte della letteratura si concentra su modelli che assumono l'ipotesi di una **linea produttiva non affidabile**, ovvero una linea costituita da macchinari soggetti a guasti e inefficienze. In questi scenari, i guasti comportano interruzioni temporanee che influenzano negativamente la produttività complessiva. Il dimensionamento corretto dei buffer diventa quindi cruciale per **assorbire le irregolarità operative e migliorare la resilienza del sistema**.

2.5 Metodi di dimensionamento del buffer

Il buffer, affinché svolga efficacemente questo ruolo, non deve essere né eccessivamente pieno, né completamente vuoto: in entrambi i casi si rischia l'arresto della produzione. Se correttamente dimensionato, come già citato precedentemente, consente di disaccoppiare le singole stazioni l'una dall'altra, permettendo agli stadi a monte e a valle di proseguire le lavorazioni anche in presenza di microfermate, fermate programmate o manutenzioni locali, grazie all'accumulo e al prelievo di pezzi semilavorati.

L'assenza di indipendenza tra gli stadi, invece, può determinare fenomeni critici come il blocking e lo starving, già trattati nel Capitolo 2.1.1. Per questo motivo, il corretto dimensionamento del buffer rappresenta un problema di ottimizzazione rilevante e complesso.

I punti di stoccaggio trovano impiego prevalente nelle linee di produzione asincrone, dove servono a compensare i tempi di inattività dovuti a guasti brevi o a operazioni di manutenzione ordinaria e straordinaria. La capacità del buffer deve essere calcolata in funzione delle esigenze produttive, garantendo un'oscillazione tra un livello minimo e uno massimo di riempimento, tale da prevenire arresti della linea.

I principali approcci per il dimensionamento dei buffer possono essere suddivisi in tre categorie:

- **Explicit Solutions Method** (Soluzioni esplicite)
- **Iterative Optimization Method** (Metodi di ottimizzazione iterativi)
- **Simulation** (Metodi di simulazione)

2.5.1 Explicit Solutions Method (Soluzioni esplicite)

Questa categoria di metodi si basa sull'impiego di formule o regole esplicite, finalizzate a determinare la posizione e la capacità ottimale dei buffer lungo la linea produttiva. L'approccio consiste nell'utilizzare parametri noti e prestabiliti per ottenere una soluzione diretta al problema di allocazione. Tali metodi si articolano in tre principali sottocategorie:

- **Metodi analiticamente esatti (Exact Analytical Methods)**: si fondano su una stima deterministica delle potenzialità produttive delle stazioni. Mediante formule matematiche esplicite è possibile calcolare con precisione la capacità necessaria del buffer. Un esempio emblematico di questa tipologia è rappresentato dal **metodo del serbatoio**.
- **Metodi analitici basati su valutazioni approssimative (Analytical Methods Based on Approximate Performance Evaluations)**: in questo caso, si utilizzano modelli di regressione e stime empiriche per superare le limitazioni dei metodi esatti, introducendo maggiore flessibilità nel modello. L'obiettivo è quello di ottenere soluzioni attendibili anche in presenza di ipotesi semplificate o non rigorose.
- **Metodi basati sullo studio delle caratteristiche ottimali della linea (Methods Based on an Investigation of Optimal Solution Characteristics)**:

questi metodi si focalizzano sull'analisi delle configurazioni produttive considerate "ottimali", cercando di dimensionare una linea il più possibile simile a tali casi di riferimento.

In letteratura, tra i contributi più recenti, il lavoro di Battini et al. (2019) propone un modello innovativo per il dimensionamento della capacità del buffer, che tiene conto dei parametri di Mean Time To Repair (MTTR) e dell'affidabilità degli stadi coinvolti. La formula sperimentale proposta è la seguente:

$$BufferCapacity = k(P, R) * G * Qmax$$

dove il $Qmax$ rappresenta la massima capacità produttiva tra stadio a monte e stadio a valle, G rappresenta il $Max(MTTRa, MTTRb)$ e in fine $K(P, R)$ è un fattore che dipende da P ed R.

i due parametri di Decisione P ed R sono definiti da:

$$P = \frac{Aa}{Ab}$$

$$R = \frac{MTTRa}{MTTRb}$$

e in fine la dalla tabella 2.6 è possibile ricavare il parametro K

R= MTTRa / MTTRb	P= Aa/Ab: 0,93<P<0,98	0,98<=P<=1,03	1,03<P<1,08
0,00 – 0,08	K=1		
0,08 – 0,20	K=1,1	K=1,1	K=1,1
0,20 – 0,30	K=1,2	K=1,2	K=1,1
0,30 – 0,80	K=1,4	K=1,3	K=1,2
0,80 – 0,90	K=1,8	K=1,8	K=1,6
0,90 – 1,10	K=1,1	K=1,1	K=1,1
1,10 – 2,00	K=1,8	K=1,8	K=1,7
2,00 – 2,50	K=1,8	K=1,2	K=1,7
2,50 – 6,00	K=1,2	K=1,1	K=1,1
6,00	K=1		

Figura 2.6: Matrice sperimentale dei coefficienti di sicurezza

2.6 Dimensionamento del buffer con metodo del serbatoio

Nel metodo di dimensionamento a serbatoio proposto per dimensionare il buffer si assume che i tempi di fermo siano costanti e di entità trascurabile rispetto al ciclo di produzione, ma nella realtà questi downtime presentano spesso variabilità significativa, con picchi di durata e frequenza non previsti, infatti l'uso di una distribuzione a downtime costante semplifica eccessivamente il modello, impedendo di determinare efficacemente gli effetti delle lunghe attese o delle interruzioni occasionali più estese, e rischia di sottostimare lo spazio necessario per garantire la continuità operativa.

Il metodo del serbatoio per definire la dimensione ottimale del buffer si basa sull'analisi della curva che mette in relazione l'efficienza complessiva della linea con la capacità del buffer. È tracciato un grafico dove, all'aumentare dello spazio riservato al buffer, si osserva come migliora la produttività fino a un certo punto di saturazione. Questo metodo però evidenzia altre complicanze.

Innanzitutto, se ci si concentra unicamente sulla pendenza della curva significa trascurare quale sia il costo aggiuntivo per ogni unità di spazio occupata. Nella realtà, lo

spazio in fabbrica è ben limitato: ogni metro quadro, sia in termini di investimento iniziale sia di gestione. Se non considero questi costi marginali, rischio di progettare buffer non efficienti, perché l'aumento di efficienza ottenuto sarebbe ridotto rispetto all'esborso richiesto.
In secondo luogo bisogna tener conto della complessità dell'impianto nella sua totalità dato che il metodo del serbatoio non tiene conto di molte *non idealità* che sono spesso e volentieri presenti nei casi reali, quindi approssimando il tutto.

Infine, dopo che la dimensione ottimale è stata calcolata, non offre strumenti per rivedere quella scelta se cambiano le condizioni produttive. Ma visto che domanda, ordine di produzione e anche layout di fabbrica possono mutare nel tempo, se non modifico il buffer non posso rispondere efficacemente a un aumento improvviso di ordini o a una riorganizzazione delle macchine senza rifare tutti i calcoli, creando così problematiche come tempi di fermo.

Per poter applicare correttamente il metodo del serbatoio, è necessario innanzitutto identificare due stadi produttivi consecutivi:

- S1 : stadio a monte , che alimenta il buffer
- S2 : stadio a valle, che preleva dal buffer

Il primo passo consiste nel calcolo delle quantità di prodotto che entrano ed escono dal buffer:

- Qin: è la quantità entrante nel Buffer dallo stadio S1;
- $Qout$: è la quantità che esce dal buffer ed entra nello stadio S2

per poter ricavare tali valori possiamo utilizzare le seguenti formule:

$$Qin = Qs1 * (K2 * K3 * K4)s1[Pz/h]$$

$$Qout = Qs2[Pz/h]$$

Dalle formule precedenti è utile citare che Qin e Qout devono essere uguali tra loro perchè i pezzi nel buffer devono transitare e dunque ciò che entra deve essere uguale a ciò che esce dal buffer, o meglio ancora, tutto ciò che esce "sano" da s1 deve entrare poi in s2.
E' possibile ricavare anche le ore di lavorazione da parte di entrambi gli stadi in modo da studiare i flussi entranti ed uscenti dei semilavorati.

$$tsi = (oredilavoro)(K2 * K3 * K4)si$$

dove le ore di lavoro giornaliere in questo elaborato sono 8h/gg e l'indice i indica il i-esimo stadio a monte o valle di un buffer interoperazionale.

Una volta ottenuti questi valori, si procede al calcolo delle Qin e $Qout$ accumulate, sommando ogni valore come la somma dei valori precedenti. Otterremo quindi le quantità Qin, cum e $Qout, cum$ per ogni intervallo di tempo.

Per tutti gli intervalli verrà quindi calcolata la differenza tra i due valori accumulati ottenendo:

$$\Delta = Qin, cum, i - Qout, cum, i[Pz]$$

Successivamente si procede al calcolo della dimensione del Buffer sommando il valore maggiore e quello minore dal calcolo precedente ed inserendoli nella seguente formula:

$$BUFFER = (|\Delta^{+}max| + |\Delta^{-}max)(1 + k)[Pz]$$

dove:

- K è il coefficiente di sicurezza;
- $\Delta^{+}max$ il Surplus di Pezzi è dato dal macchinario a monte che produce una quantità di semilavorato in uscita maggiore del macchinario a valle.
- $\Delta^{-}max$ il deficit di pezzi , ed è il minimo valore che il Buffer deve garantire per poter continuare la produzione del macchinario a valle che elabora una quantità superiore in entrata rispetto a quella in uscita del macchinario a monte.

2.7 Alternativa 1 : Analisi di Buffer usando la distribuzione di Costanti di Downtime

2.7.1 Introduzione al Buffer

Numerosi studi sono stati condotti sul tema di come mitigare problemi dovuti al blocking o allo starving citati nei paragrafi precedenti.

J. A. Buzacott (1967) ha formulato equazioni per **determinare le dimensioni ottimali dei buffer intermedi** in una linea continua con tre macchine e due buffer. Prombanpong et al (2013) hanno proposto un progetto di buffer in una linea automatizzata per la lavorazione di componenti automobilistici, utilizzando una **distribuzione geometrica dei tempi di fermo per calcolare la capacità adeguata**. Hillier et al (1991) hanno analizzato le **prestazioni della linea durante i guasti delle macchine** e lo studio dell'effetto delle dimensioni del buffer sulle prestazioni complessive. Wijngaard (1979) ha **confrontato l'efficienza di una linea** a due stadi con **buffer di capacità finita**, tra distribuzioni costanti e geometriche dei tempi di fermo. Enginarlar et al (2002) hanno invece mostrato un **metodo per calcolare le dimensioni minime dei buffer necessarie a mantenere il tasso di produzione desiderato**.

L'obiettivo del presente lavoro è dimostrare un ***calcolo delle dimensioni del buffer basato sull'assunzione di tempi di fermo costanti***, generando soluzioni per diverse capacità di buffer. Successivamente, si determina la pendenza del grafico che mette in relazione efficienza e dimensione del buffer, scegliendo la pendenza più accentuata come criterio di ottimalità, come verrà descritto nei paragrafi successivi.

2.7.2 Problem scenario - generalizzazione

Il caso proposto da Chomnawung et al (2016) descrive la casistica in cui un buffer disacoppia due stadi produttivi composti da due macchinari ciasuno, la cui funzione è di **attenuare le perdite di produzione** dovute ai tempi di fermo per regolazione macchina.

La domanda di ricerca al tempo era: *"quanto deve essere grande il buffer affinché si ottimizzi efficacemente l'efficienza complessiva della linea?"* Per rispondere, sono stati raccolti dati relativi alla **frequenza di fermo per ciclo e al tempo medio di inattività per fermo.**

Nella presente sezione, l'elaborato di tesi descrive la possibilità di utilizzare il metodo qui descritto per il dimensionamento del serbatoio (buffer) nella linea automatica per crostini presa in esame, nello specifico tra le stazioni 4 e 5.

2.7.3 Metodologia

In una linea di produzione automatizzata, in assenza di fermi o interruzioni, l'efficienza teorica della linea è del 100%. **L'efficienza di linea E** e si definisce come la proporzione del tempo operativo rispetto al tempo totale, e può essere calcolata mediante le seguenti equazioni:

$$E_0 = \frac{T_c}{T_c + (F_1 + F_2)T_d} \tag{2.1}$$

dove:

- Tc è il tempo di ciclo (s);
- F1 e F2 sono la frequenza di fermo per ciclo (fermi/ciclo) ai due stadi;
- Td è il tempo medio di inattività per fermo (s/fermo).

l'efficienza dello stadio a valle con il buffer è:

$$E2 = \frac{T_c}{T_c + (F_2)T_d} \tag{2.2}$$

Assumendo frequenze di fermo uguali su entrambi gli stadi, l'efficienza complessiva con buffer di capacità b risulta :

$$E_b = E_0 + D_1' h(b) E_2 \tag{2.3}$$

dove h(b) è il **tasso di miglioramento fornito dal buffer**.

la propozione tra il tempo di innattività della fase 1 ed il tempo totale ti produzione è D1' e si calcola:

$$D_1' = \frac{F_1 T_d}{T_c + (F_1 + F_2)T_d} \tag{2.4}$$

se il parametro $r = \frac{F1}{F2} = 1$ allora $h(b)$ è:

$$h(b) = \frac{B}{B+1} + \left(L\,\frac{T_c}{T_d}\right)\frac{1}{(B+1)(B+2)}$$

se il parametro $r = \frac{F1}{F2} \neq 1$ allora $h(b)$ è:

$$h(b) = r\left(\frac{1-r^{B}}{1-r^{B+1}}\right) + \left(L\frac{T_c}{T_d}\right)\frac{(r^{B+1})(1-r)^2}{(1-r^{B+1})(1-r^{B+2})};$$

$$\boldsymbol{r = \frac{F_1}{F_2}\,,\ b = B\frac{T_d}{T_c} + L\,,\ B \leq b\frac{T_c}{T_d}}$$

dove:

- B è l'intero più grande
- L riferisce alla quantità di semilavorati o pezzi che rimangono accumulati nel buffer nel momento in cui si verifica un guasto o un'interruzione in uno dei due stadi.

Nel nostro caso studio si applica il caso in cui $r \neq 1$

2.8 Riferimento immagini

Qui vi è riportato i link di riferimento alle immagini del capitolo 2

- Figura 2.1, https://www.cfsystem.it/news/index-2.html
- Figura 2.2, https://www.nastec.it/products/Tavole-rotanti-su-misura/Tavola-rotante/
- Figura 2.3, https://www.logisticsbusiness.com/materials-handling-warehousing/automation-handling-systems/pallet-buffer-system-can-sequence-460-p-hr/
- Figura 2.4, https://www.urbinati.com/it/prodotto/tavolo-accumulo-raggruppare/
- Figura 2.5, https://corriereinnovazione.corriere.it/2015/12/11/nuova-idea-fabbrica-viaggio-nell-industria-40-c9db836e-a009-11e5-9e42-3aa7b5e47d96.shtml
- Figura 2.6, disponibile presso l'archivio tesi UniPD – Giordanelli, Marta.

Capitolo 3

Caso Studio

3.1 Introduzione

Il presente progetto di tesi ha come obiettivo il **dimensionamento di un impianto di produzione di crostini**. Nella prima parte del caso studio ci si concentra sulla p**rogettazione e sul dimensionamento** dei macchinari all'interno di una linea di produzione asincrona.

Un'attenzione particolare è rivolta alla **progettazione del buffer posizionato tra il macchinario 4 (cottura) e il macchinario 5 (confezionamento)**. Oltre al tradizionale metodo del serbatoio, verranno analizzati altri metodi di dimensionamento, con l'obiettivo di confrontare le prestazioni e determinare la soluzione più efficiente.

Infine, i risultati ottenuti saranno validati tramite simulazione del processo produttivo su FlexSim, al fine di confrontare l'efficacia dei diversi approcci e selezionare quello più adatto in termini di affidabilità ed efficienza produttiva.

3.2 Dati di progetto

Qui sotto vi è riportata una rappresentazione schematica generale della linea di produzione in esame:

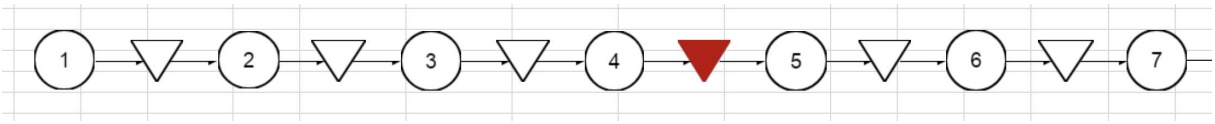

Figura 3.1: Rappresentazione schemartica della Linea in esame

In seguito vi è riportata la tabella con tutte le caratteristiche di progetto

Fase	Q Nominale	Tj	Crostini	u.m.	K1	K2	K3	K4
1. Impastamento	5 imp/h	12 min/imp	15000	crost/imp	90%	98%	85%	87%
2. Fromatura	24000 batt/h	0,00min/batt	30	crost/batt	92%	95%	100%	98%
3. Lievitazione	3500 tg/h	0,02 min/tegl	200	crost/tegli	98%	97%	100%	95%
4. Cottura	3400 tg/h	0,02 min/tegl	200	crost/tegli	100%	96%	100%	97%
5. Confezionamento	10000 conf/h	0,01 min/conf	60	crost/conf	96%	98%	85%	89%
6. Sigillatura	11000 conf/h	0,01 min/conf	60	crost/conf	95%	98%	100%	91%
7. Inscatolamento	700 carton/h	0,09 min/carton	1200	crost/carton	94%	93%	85%	86%

Tabella 3.1: Esempio di tabella dati con coefficienti K e accuratezze

Dove la *Qout* di progetto al settimo stadio è di **500'000 crostini/h**

3.3 Dimensionamento Linea

Si procede ora a dimensionare la linea con il metodo dei **calcoli diretti** visto in precedenza. Di seguito sono ripostati i calcoli.

$$Q_7 = \frac{Q_u}{(K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4)_s} = \frac{Q_u}{\eta_7} = \frac{500000}{0,6390402} = 782423,4\,[\text{crostini/h}] \tag{3.1}$$

$$Q_6 = \frac{\frac{Q_u}{(K_1)_7}}{(K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4)_6} = \frac{\frac{Q_u}{(K_1)_7}}{\eta_6} = \frac{\frac{500000}{0.94}}{0,84721} = 627843,0 \text{ crostini/h}$$

$$Q_5 = \frac{\frac{Q_u}{(K_1)_{7,6}}}{(K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4)_5} = \frac{\frac{Q_u}{(K_1)_{7,6}}}{\eta_5} = \frac{\frac{500000}{0.95 * 0.94}}{0,7117152} = 786705,7 \text{ crostini/h}$$

$$Q_4 = \frac{\frac{Q_u}{(K_1)_{7,6,5}}}{(K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4)_4} = \frac{\frac{Q_u}{(K_1)_{7,6,5}}}{\eta_4} = \frac{\frac{500000}{0.95 * 0.94 * 0.96}}{0,9312} = 626331,6 \text{ crostini/h}$$

$$Q_3 = \frac{\frac{Q_u}{(K_1)_{7,6,5,4}}}{(K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4)_3} = \frac{\frac{Q_u}{(K_1)_{7,6,5,4}}}{\eta_3} = \frac{\frac{500000}{0.95 * 0.94 * 0.96 * 1}}{0,90307} = 645841,4 \text{ crostini/h}$$

$$Q_2 = \frac{\frac{Q_u}{(K_1)_{7,6,5,4,3}}}{(K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4)_2} = \frac{\frac{Q_u}{(K_1)_{7,6,5,4,3}}}{\eta_2} = \frac{\frac{500000}{0.95 * 0.94 * 0.96 * 1 * 0.98}}{0,85652} = 694838,3 \text{ crostini/h}$$

$$Q_1 = \frac{\frac{Q_u}{(K_1)_{7,6,5,4,3,2}}}{(K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4)_1} = \frac{\frac{Q_u}{(K_1)_{7,6,5,4,3,2}}}{\eta_1}$$
$$= \frac{\frac{500000}{0.95 \cdot 0.94 \cdot 0.96 \cdot 1 \cdot 0.98 \cdot 0.92}}{0.652239} = 991805{,}8 \text{ crostini/h}$$

Grazie alle potenzialità di stadio si procede con il calcolo del numero reale di macchinari:

$$n'_7 = \frac{Q_7 \cdot t_7}{60} = \frac{782423,4 * 0.09}{60} = 0.9314 \tag{3.2}$$

$$n'_6 = \frac{Q_6 \cdot t_6}{60} = \frac{627843,0 * 0.01}{60} = 0.9512 \tag{3.3}$$

$$n'_5 = \frac{Q_5 \cdot t_5}{60} = \frac{786705,7 * 0.01}{60} = 1.3111 \tag{3.4}$$

$$n'_4 = \frac{Q_4 \cdot t_4}{60} = \frac{626331,6 * 0.02}{60} = 0.9211 \tag{3.5}$$

$$n'_3 = \frac{Q_3 \cdot t_3}{60} = \frac{645841,4 * 0.02}{60} = 0.9226 \tag{3.6}$$

$$n'_2 = \frac{Q_2 \cdot t_2}{60} = \frac{694838,3 * 0.0025}{60} = 0.9650 \tag{3.7}$$

$$n_1' = \frac{Q_1 \cdot t_1}{60} = \frac{991805{,}8 * 5}{60} = 1.3224 \tag{3.8}$$

Di conseguenza il numero dei macchinari reali è:

$$n_7 = \lceil n_7' \rceil = 1 \tag{3.9}$$

$$n_6 = \lceil n_6' \rceil = 1 \tag{3.10}$$

$$n_5 = \lceil n_5' \rceil = 2 \tag{3.11}$$

$$n_4 = \lceil n_4' \rceil = 1 \tag{3.12}$$

$$n_3 = \lceil n_3' \rceil = 1 \tag{3.13}$$

$$n_2 = \lceil n_2' \rceil = 1 \tag{3.14}$$

$$n_1 = \lceil n_1' \rceil = 2 \tag{3.15}$$

Calcolo dei coefficienti di utilizzo teorico e reale per stadio:

$$U_{t,7} = \frac{n_7'}{n_7} = 0.9314 \quad U_{r,7} = U_{t,7} \cdot K_{4,7} = 0.8010 \tag{3.16}$$

$$U_{t,6} = \frac{n_6'}{n_6} = 0.9512 \quad U_{r,6} = U_{t,6} \cdot K_{4,6} = 0.8656 \tag{3.17}$$

$$U_{t,5} = \frac{n_5'}{n_5} = 0.6555 \quad U_{r,5} = U_{t,5} \cdot K_{4,5} = 0.5834 \tag{3.18}$$

$$U_{t,4} = \frac{n_4'}{n_4} = 0.9211 \quad U_{r,4} = U_{t,4} \cdot K_{4,4} = 0.8934 \tag{3.19}$$

$$U_{t,3} = \frac{n_3'}{n_3} = 0.9226 \quad U_{r,3} = U_{t,3} \cdot K_{4,3} = 0.8764 \tag{3.20}$$

$$U_{t,2} = \frac{n_2'}{n_2} = 0.9650 \quad U_{r,2} = U_{t,2} \cdot K_{4,2} = 0.9457 \tag{3.21}$$

$$U_{t,1} = \frac{n_1'}{n_1} = 0.6612 \quad U_{r,1} = U_{t,1} \cdot K_{4,1} = 0.5752 \tag{3.22}$$

E in fine grazie a questi calcoli si procede con il calcolo completo del **coefficiente di Utilizzo teorico di linea e Utilizzo Reale di linea**:

$Ut, linea = 0.8138 \quad Ur, linea = 0.7444$

3.4 Dimensionamento Buffer "metodo del serbatoio" caso studio

In questo caso studio, al fine di garantire una **maggiore precisione** e **completezza nei calcoli**, si è deciso di dimensionare singolarmente ciascuno dei sei buffer presenti lungo l'intera linea produttiva , suddividendo l'intera giornata lavorativa composta da 8 ore,in intervalli di un minuto, per un totale di 480 minuti.
I calcoli sono stati quindi eseguiti minuto per minuto, suddividendo ogni ora in 60 minuti, al fine di **analizzare in dettaglio l'andamento dei flussi lungo la linea**.

Al fine di rendere più chiara l'esposizione, in Figura 3.2 è riportato un esempio di calcolo relativo al buffer situato tra la stazione 4 e la stazione 5, riferito alla prima ora di lavoro.
Si osserva che i calcoli relativi alle ore successive, così come quelli eseguiti per gli altri buffer, seguono la medesima metodologia. A seguire, è riportata una tabella riepilogativa contenente le capacità CB calcolate per ciascun buffer.

ore di lavoro	minuti	on/off	A	Aacc		on/off	B	on/off	B	SOMMA	Bacc		DELTA		MAX	64861,4023
0	1	ON	10438,86052	10438,86052		ON	6555,880948	OFF	0	6555,880948	6555,880948		3882,979573		MIN	-21942,34767
	2	ON	10438,86052	20877,72104		ON	6555,880948	OFF	0	6555,880948	13111,7619		7765,959145		CB	95484,12496
	3	ON	10438,86052	31316,58156		ON	6555,880948	OFF	0	6555,880948	19667,64284		11648,93872		cb in funzione	0,12%
	4	ON	10438,86052	41755,44208		ON	6555,880948	OFF	0	6555,880948	26223,52379		15531,91829			
	5	ON	10438,86052	52194,3026		ON	6555,880948	OFF	0	6555,880948	32779,40474		19414,89786			
	6	ON	10438,86052	62633,16312		ON	6555,880948	OFF	0	6555,880948	39335,28569		23297,87744			
	7	ON	10438,86052	73072,02364		ON	6555,880948	OFF	0	6555,880948	45891,16664		27180,85701			
	8	ON	10438,86052	83510,88416		ON	6555,880948	OFF	0	6555,880948	52447,04758		31063,83658			
	9	ON	10438,86052	93949,74468		ON	6555,880948	OFF	0	6555,880948	59002,92853		34946,81615			
	10	ON	10438,86052	104388,6052		ON	6555,880948	OFF	0	6555,880948	65558,80948		38829,79573			
	11	ON	10438,86052	114827,4657		ON	6555,880948	OFF	0	6555,880948	72114,69043		42712,7753			
	12	ON	10438,86052	125266,3262		ON	6555,880948	OFF	0	6555,880948	78670,57137		46595,75487			
	13	ON	10438,86052	135705,1868		ON	6555,880948	OFF	0	6555,880948	85226,45232		50478,73444			
	14	ON	10438,86052	146144,0473		ON	6555,880948	OFF	0	6555,880948	91782,33327		54361,71402			
	15	ON	10438,86052	156582,9078		ON	6555,880948	OFF	0	6555,880948	98338,21422		58244,69359			
	16	ON	10438,86052	167021,7683		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	111449,9761		55571,79221			
	17	ON	10438,86052	177460,6288		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	124561,738		52898,89084			
	18	ON	10438,86052	187899,4894		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	137673,4999		50225,98946			
	19	ON	10438,86052	198338,3499		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	150785,2618		47553,08809			
	20	ON	10438,86052	208777,2104		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	163897,0237		44880,18671			
	21	ON	10438,86052	219216,0709		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	177008,7856		42207,28534			
	22	ON	10438,86052	229654,9315		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	190120,5475		39534,38396			
	23	ON	10438,86052	240093,792		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	203232,3094		36861,48259			
	24	ON	10438,86052	250532,6525		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	216344,0713		34188,58121			
	25	ON	10438,86052	260971,513		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	229455,8332		31515,67984			
	26	ON	10438,86052	271410,3735		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	242567,5951		28842,77846			
	27	ON	10438,86052	281849,2341		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	255679,357		26169,87709			
	28	ON	10438,86052	292288,0946		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	268791,1189		23496,97571			
	29	ON	10438,86052	302726,9551		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	281902,8808		20824,07433			
	30	ON	10438,86052	313165,8156		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	295014,6427		18151,17296			
	31	ON	10438,86052	323604,6761		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	308126,4046		15478,27158			
	32	ON	10438,86052	334043,5367		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	321238,1664		12805,37021			
	33	ON	10438,86052	344482,3972		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	334349,9283		10132,46883			
	34	ON	10438,86052	354921,2577		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	347461,6902		7459,567458			
	35	ON	10438,86052	365360,1182		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	360573,4521		4786,666083			
	36	ON	10438,86052	375798,9787		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	373685,214		2113,764708			
	37	ON	10438,86052	386237,8393		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	386796,9759		-559,1366676			
	38	ON	10438,86052	396676,6998		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	399908,7378		-3232,038043			
	39	ON	10438,86052	407115,5603		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	413020,4997		-5904,939418			
	40	ON	10438,86052	417554,4208		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	426132,2616		-8577,840793			
	41	ON	10438,86052	427993,2813		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	439244,0235		-11250,74217			
	42	ON	10438,86052	438432,1419		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	452355,7854		-13923,64354			
	43	ON	10438,86052	448871,0024		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	465467,5473		-16596,54492			
	44	ON	10438,86052	459309,8629		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	478579,3092		-19269,44629			
	45	ON	10438,86052	469748,7234		ON	6555,880948	ON	6555,880948	13111,7619	491691,0711		-21942,34767			
	46	ON	10438,86052	480187,5839		OFF	0	ON	6555,880948	6555,880948	498246,952		-18059,3681			
	47	ON	10438,86052	490626,4445		OFF	0	ON	6555,880948	6555,880948	504802,833		-14176,38852			
	48	ON	10438,86052	501065,305		OFF	0	ON	6555,880948	6555,880948	511358,7139		-10293,40895			
	49	ON	10438,86052	511504,1655		OFF	0	ON	6555,880948	6555,880948	517914,5949		-6410,42938			
	50	ON	10438,86052	521943,026		OFF	0	ON	6555,880948	6555,880948	524470,4758		-2527,449807			
	51	ON	10438,86052	532381,8865		OFF	0	ON	6555,880948	6555,880948	531026,3568		1355,529766			
	52	ON	10438,86052	542820,7471		OFF	0	ON	6555,880948	6555,880948	537582,2377		5238,509338			
	53	ON	10438,86052	553259,6076		OFF	0	ON	6555,880948	6555,880948	544138,1187		9121,488911			
	54	ON	10438,86052	563698,4681		OFF	0	ON	6555,880948	6555,880948	550693,9996		13004,46848			
	55	ON	10438,86052	574137,3286		OFF	0	ON	6555,880948	6555,880948	557249,8806		16887,44806			
	56	ON	10438,86052	584576,1891		OFF	0	ON	6555,880948	6555,880948	563805,7615		20770,42763			
	57	OFF	0	584576,1891		OFF	0	ON	6555,880948	6555,880948	570361,6425		14214,54668			
	58	OFF	0	584576,1891		OFF	0	ON	6555,880948	6555,880948	576917,5234		7658,665733			
	59	OFF	0	584576,1891		OFF	0	ON	6555,880948	6555,880948	583473,4044		1102,784785			
1	60	OFF	0	584576,1891	583240,015	OFF	0	ON	6555,880948	6555,880948	590029,2853	583240,015	-5453,096163			

Figura 3.2: Esempio di calcolo del buffer tra la stazione 4 e la stazione 5 nella prima ora di lavoro

dove:

- A : Rappresenta lo stadio a monte del serbatoio i-esimo;
- Aacc : Rappresenta il valore dei calcoli accumulati in "A" fino al valore precedente;
- B : Rappresenta lo stadio a valle del serbatoio i-esimo;
- Bacc : Rappresenta il valore dei calcoli accumulati in "B" fino al valore precedente;
- Max : Rappresenta la Massima escursione positiva nel calcolo del Δ;
- Min : Rappresenta la Massima escursione negativa nel calcolo del Δ.

in seguito, la tabella 3.2 riassume le capacità calcolate sul foglio di calcolo.

Nota: il buffer i–j è quello compreso fra la stazione i e j, dove 1 è lo stadio a monte e 7 e lo stadio a valle della linea in esame.

Buffer	**Capacità buffer (CB)**
6–7	153 089,05
5–6	75 430,38
4–5	95 484,14
3–4	19 218,49
2–3	30 205,16
1–2	178 281,53

Tabella 3.2: Capacità calcolata per ciascun buffer della linea produttiva

3.4.1 Evoluzione del contenuto dei buffer durante il turno di lavoro

Per comprendere meglio il comportamento dinamico di ciascun buffer, si è analizzato l'andamento temporale del bilancio tra ingresso e uscita di prodotto (Δ) lungo le 8 ore operative.

Valori positivi di Δ indicano un **accumulo** nel buffer, mentre valori negativi evidenziano una **riduzione** del contenuto.
Queste rappresentazioni sono utili per valutare l'efficacia del dimensionamento proposto e individuare eventuali criticità in fase di produzione continua.

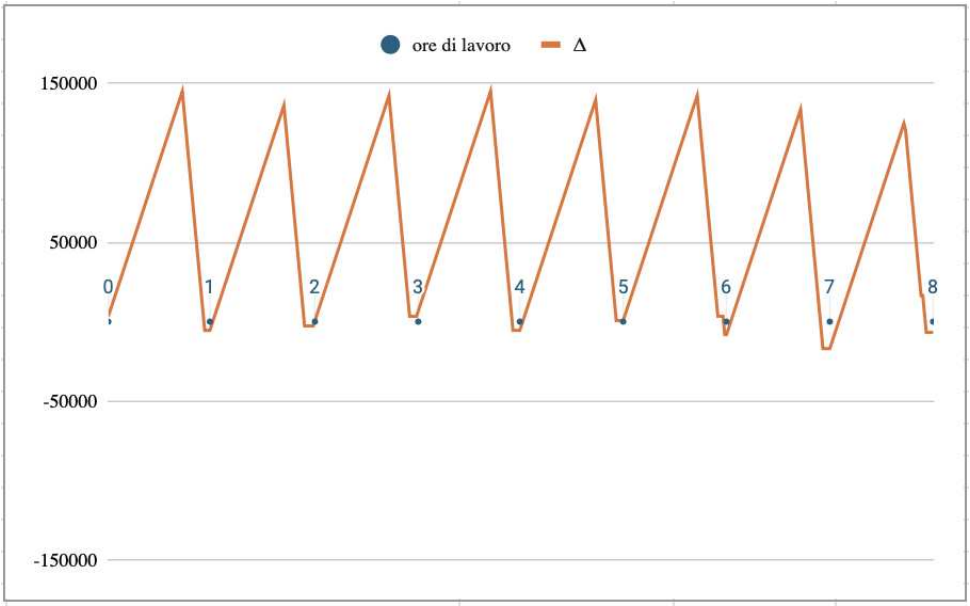

Figura 3.3: Andamento temporale del contenuto nel Buffer 1-2

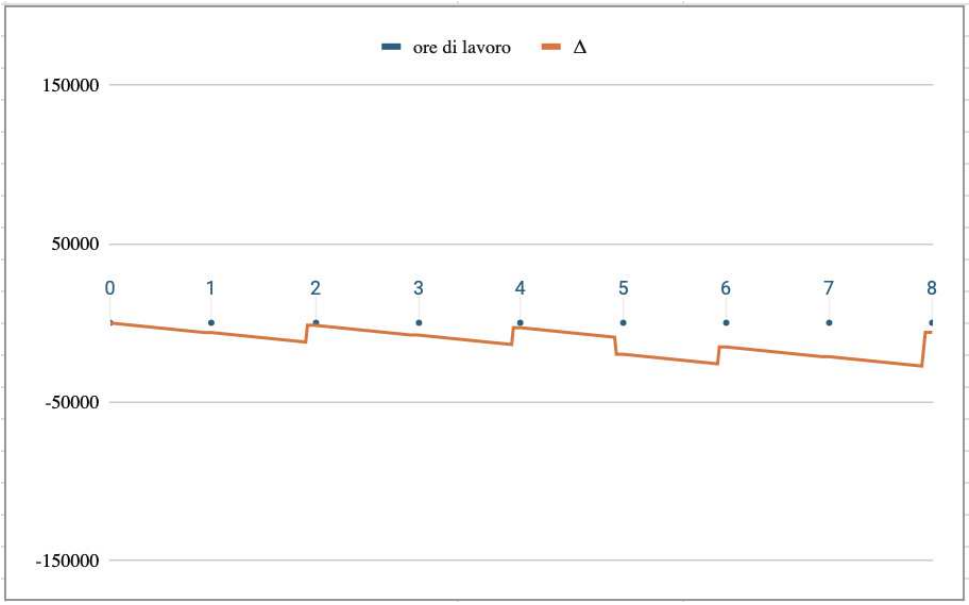

Figura 3.4: Andamento temporale del contenuto nel Buffer 2-3

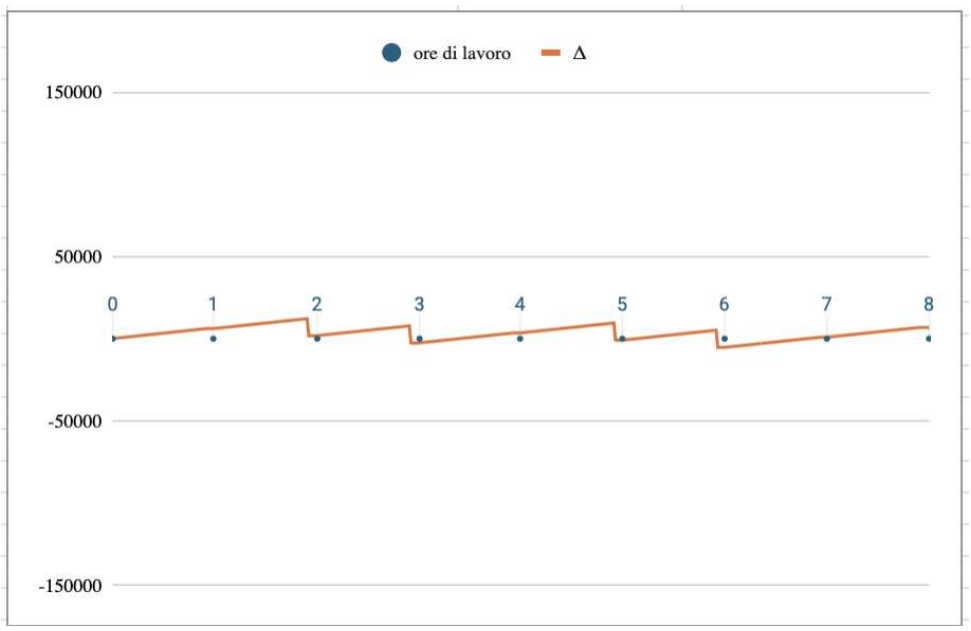

Figura 3.5: Andamento temporale del contenuto nel Buffer 3-4

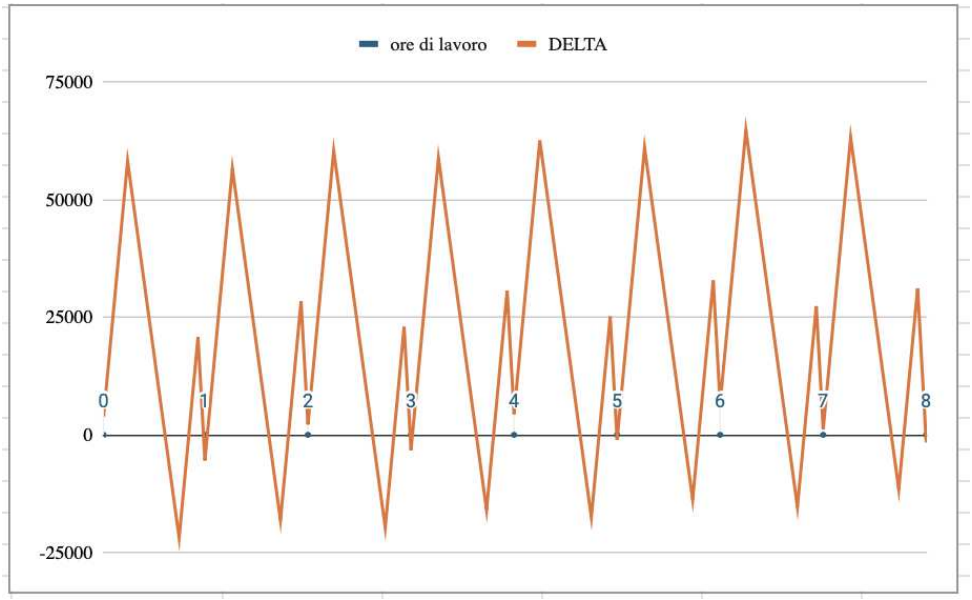

Figura 3.6: Andamento temporale del contenuto nel Buffer 4-5

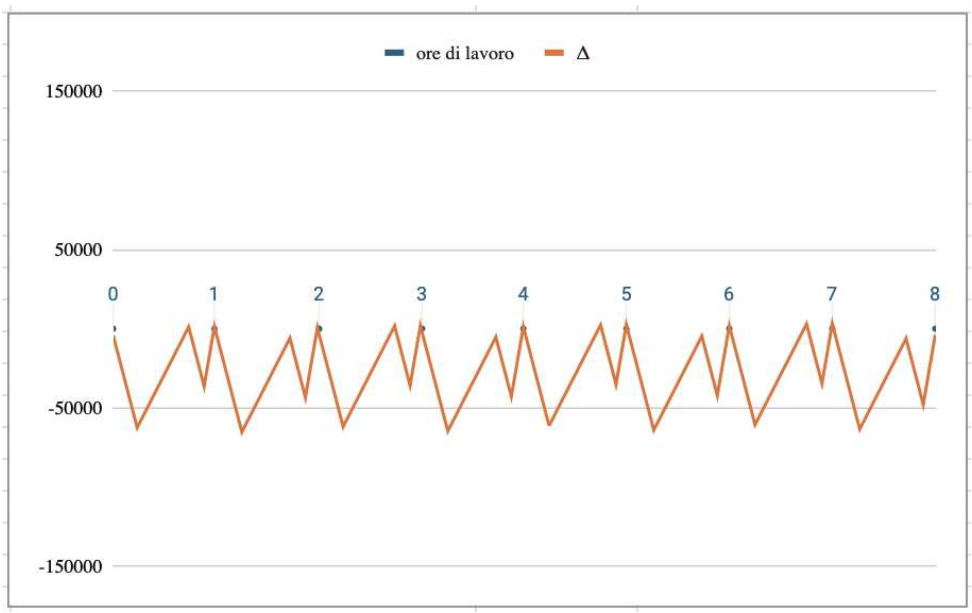

Figura 3.7: Andamento temporale del contenuto nel Buffer 5-6

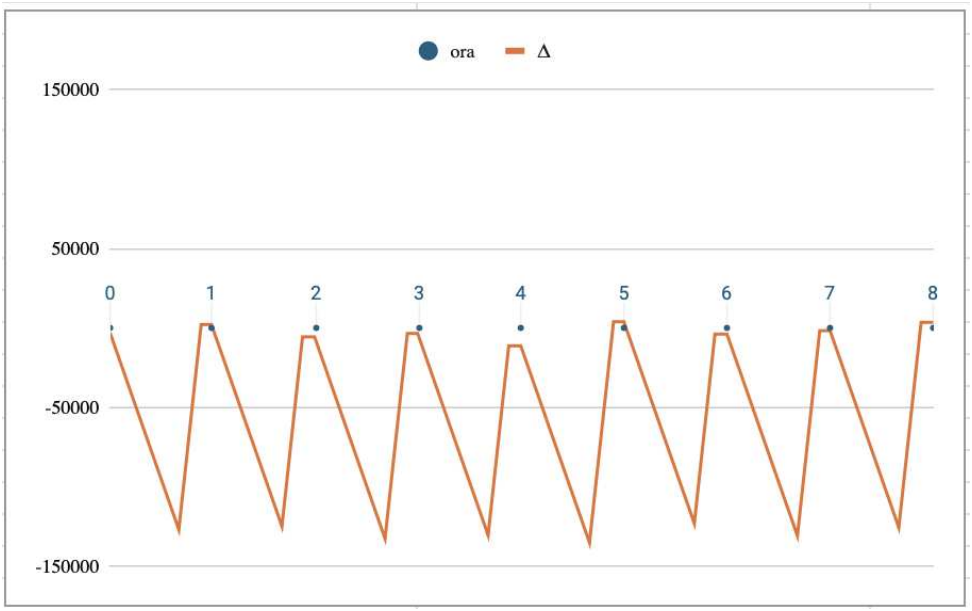

Figura 3.8: Andamento temporale del contenuto nel Buffer 6-7

3.5 Dimensionamento buffer con alternativa 1

Nel caso studio di questo progetto, si calcola attraverso i metodo elencati precedentemente, il numero di macchinari per ogni stazione. Il Buffer in analisi (quello compreso la stazione 4 e la stazione 5) comporta uno studio suddiviso in due parti, visto che nella stazione a valle (il confezionamento) è stato dimensionato per lavorare con due macchinari.

3.5.1 Caso studio con 1 macchinario a valle

$$E_0 = \frac{T_c}{T_c + (F_1 + F_2)T_d} = \frac{7.45}{7.45 + (\frac{9}{120} + \frac{30}{120}) * 0.55} = 97.66 \tag{3.23}$$

la efficienza dello stadio a valle con il buffer è:

$$E2 = \frac{T_c}{T_c + (F_2)T_d} = \frac{7.45}{7.45 + (\frac{30}{120}) * 0.55} = 98.19 \tag{3.24}$$

la propozione tra il tempo di innattività della fase 1 ed il tempo totale ti produzione è D1' e si calcola:

$$D_1' = \frac{F_1 T_d}{T_c + (F_1 + F_2)T_d} = 5.41 * 10^-3 \tag{3.25}$$

in questo caso $r \neq 1$ infatti $r = \frac{F1}{F2}$ =0.3

e quindi il calcolo ora l'intero più grande B:

$B \leq b\frac{Tc}{Td} = 4977292\frac{7.45}{0.55} = 67419682$

ora si procede con il calcolo di L invertendo la formula:

$L = b - B\frac{Td}{Tc} = -39.96$
con questi risultati si può calcolare il Tasso di migliormento fornito dal Buffer:

$$h(4977252) = r\left(\frac{1 - r^B}{1 - r^{B+1}}\right) + \left(\frac{L\frac{T_c}{T_d}(r^{B+1})(1 - r)^2}{(1 - r^{B+1})(1 - r^{B+2})}\right); \tag{3.26}$$

ma siccome il secondo termine per numeri troppo elevati si elide, allora diventa:
$h(b) = r\frac{1-r^B}{1-r^{B+1}} = 0.3$

e quindi in fine,l'efficienza complessiva nella linea composta fra macchinario a monte e a valle del buffer di capacità b risulta :

$$E_b = E_0 + D_1' h(b) E_2 = 97.66 + 5.41 * 10^-3 * 0.3 * 98.19 = 97.82 \tag{3.27}$$

Si procede con il medesimo calcolo, ma con **a valle le stazioni 5 in parallelo sul calcolo di F2** (visto che si hanno due macchinari):

3.5.2 Caso studio con 2 macchinari a valle

$$E_0 = \frac{T_c}{T_c + (F_1 + F_2)T_d} = \frac{7.45}{7.45 + (\frac{9}{120} + \frac{30}{120} // \frac{30}{120}) * 0.55} = 98.52 \tag{3.28}$$

la efficienza dello stadio a valle con il buffer è:

$$E2 = \frac{T_c}{T_c + \frac{F2*F2,1}{F2+F2,1} T_d} = 99.1 \tag{3.29}$$

la propozione tra il tempo di innattività della fase 1 ed il tempo totale ti produzione è D1' e si calcola:

$$D_1' = \frac{F_1 T_d}{T_c + (F1 + \frac{F2*F2,1}{F2+F2,1})T_d} = 5.45 * 10^-3 \tag{3.30}$$

in questo caso $r \neq 1$ infatti $r = \frac{F1}{F2}$ =0.581

In fine,l'efficienza complessiva nella linea composta fra macchinario a monte e a valle del buffer di capacità b risulta :

$$E_b = E_0 + D_1' h(b) E_2 = 98.52 + 5.45 * 10^-3 * 0.581 * 99.1 = 98.83 \tag{3.31}$$

3.6 Conlusioni relative all'alternativa 1

Attraverso il nuovo approccio di dimensionamento del buffer sono state formulate e valutate due distinte ipotesi operative:

- **Configurazione "single-machine"**

  Si è ipotizzato un unico macchinario a valle (stazione.5). In questo scenario, il calcolo dell'efficienza complessiva tra la stazione.4 e la stazione.5, comprensiva del buffer intermedio, ha restituito un valore pari al 97,82%.

- **Configurazione "dual-machine"**

Si è considerata la presenza di due macchinari in coda allo stadio.5. Ripetendo integralmente il calcolo dell'efficienza per questa nuova configurazione, il risultato è salito al 98,83% tra la stazione.4 e la stazione.5 con buffer installato.

Da questi risultati emerge che l'inserimento di un secondo macchinario a valle migliora l'efficienza del sottosistema considerato, riducendo le micro–fermate e incrementando il coefficiente di utilizzo K2.

Tuttavia, il metodo basato sulle formula di miglioramento h(b) comporta un elevato carico computazionale: occorrerebbe iterare la capacità b del buffer, tracciare i corrispondenti valori di efficienza e individuare, mediante analisi della pendenza, il punto di massima resa marginale.

Tale procedura risulta poco pratica quando il flusso di crostini supera elevati volumi orari (nell'ordine di 4.977.292 pezzi/giorno), poiché la funzione di miglioramento tende rapidamente al limite $r = \frac{F1}{F2}$ e ogni incremento di b aggiuntivo produce un guadagno d'efficienza trascurabile.

In conclusione, l'aumento del numero di macchine a valle si rivela l'unica leva in grado di migliorare sensibilmente l'efficienza del tratto 4–5, garantendo una gestione più fluida del flusso produttivo

Mediante i calcoli proposti da questa alternativa, si è giunti alla conclusione che la capacità del buffer nel caso studio risulta essere di: $CB = 125032,465$ crostini. Considerando che, come calcolato e riportato precedentemente, il metodo di dimensionamento a serbatoio fornisce una capacità pari a: $CB = 95484,12$ crostini,si può dedurre che tale metodo risulti meno efficiente rispetto al metodo tradizionale adottato in questa analisi.

in Figura 4.24 si riporta il Grafico che rappresenta l'andamento del Δ:

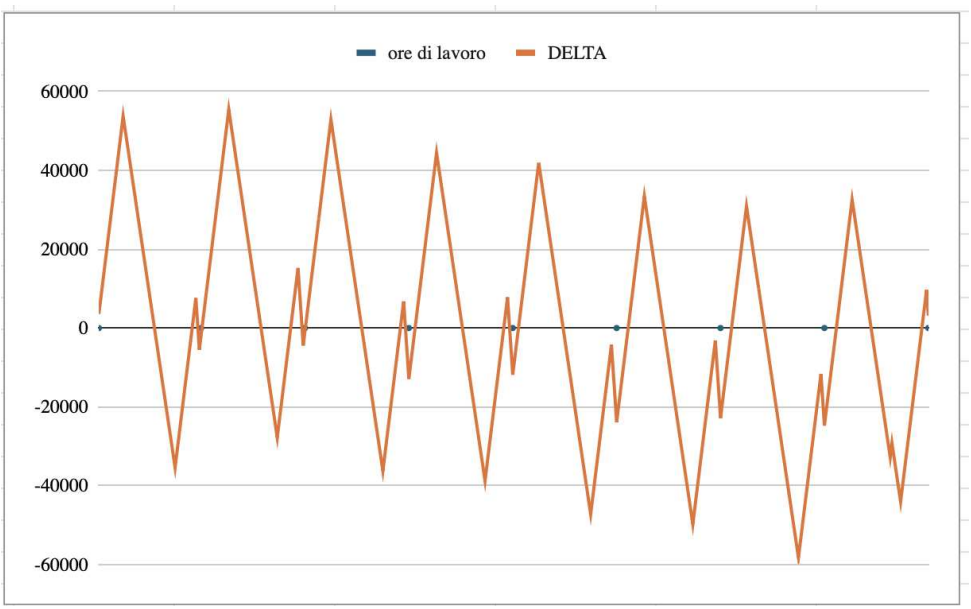

Figura 3.9: Buffer Alternativa 1: caso studio configurazione "dual-machine"

Capitolo 4

Simulazione

4.1 Cos'è Flexim?

Flexim è un software che permette la simulazione di un impianto di produzione. Grazie alle sue numerose funzioni si può personalizzare la linea, valutando sia visivamente che graficamente i vantaggi e svantaggi della stessa.

A differenza di altri software simulativi , Flexsim non necessita la scrittura di codici in un linguaggio specifico. Nei paragrafi qui sotto riportati si trovano i cosidetti **"blocchi"** per la realizzazione della linea.

4.2 Funzioni principali usate nella simulazione

Il **source** è una funzione importante per lo svolgimento della simulazione, che consiste nella fonte da cui escono i materiali che verranno poi lavorati nei macchinari successivi. Nel nostro caso studio abbiamo impostato tale funzione con un **"Inter-Arrival"** di **1ms**, così da garantire la disponibilità dei pezzi alle macchine. Nella sezione source delle properties abbiamo impostato l'arrival style in "Inter-Arrival Time" inserendo il valore di 1ms (Figura 4.2)

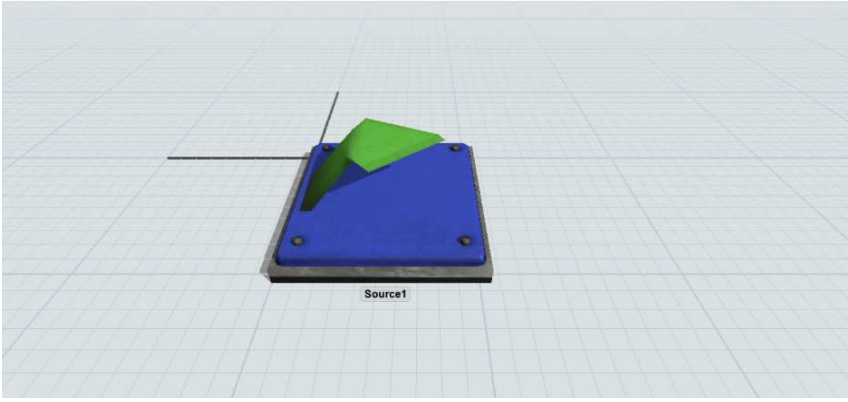

Figura 4.1: Rappresentazione grafica del source

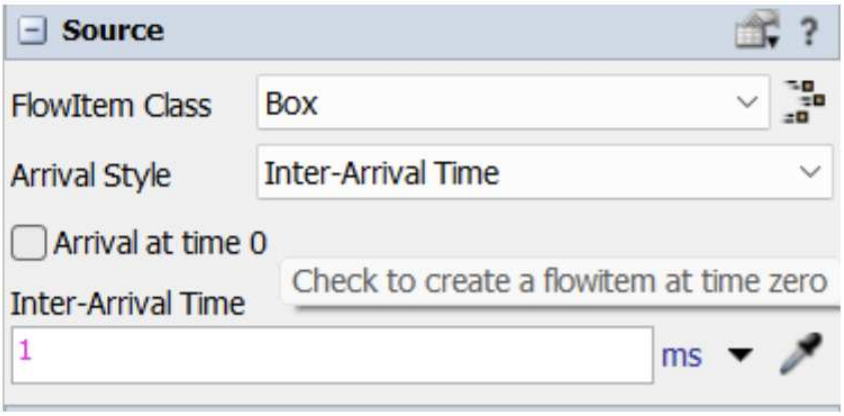

Figura 4.2: Sezione properties del source

In secondo luogo troviamo il **"Processor"**. Questo rappresenta i diversi macchinari evidenziando il processo di lavorazione per ogni elemento

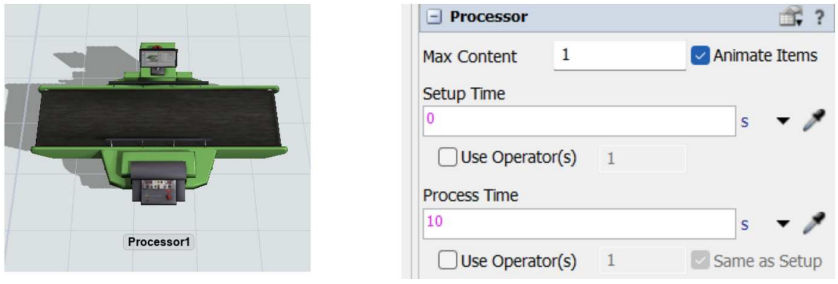

Figura 4.3: Rappresentazione grafica del processor

Si è impostato il process time con il tempo di lavorazione della macchina per ogni crostino. Usando i dati forniti dalla tabella 3.4 e secondo la formula : $\frac{Tj}{crostini/h}$ e successivamente trasformando i tempi in ms per migliori approssimazioni.

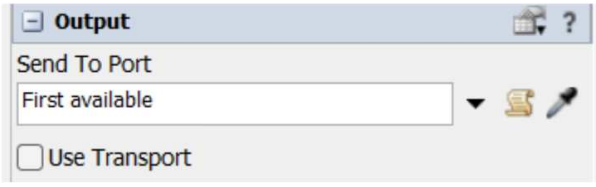

Figura 4.4: Ouput processor

Modificando la sezione "output" abbiamo impostato i valori dei vari coefficienti K1 usando la funzione "Random" presente nel menù a tendina sotto la voce "Send to Port" (figura 4.4) e successivamente → "by percentage", andando così ad imporre la percentuale di pezzi conformi che vengono inviati al buffer successivo (porta 1) e quelli non conformi che vengono inviati invece al Sink (porta 2), come riportato in Figura 4.5 dove si configura il macchinario 1

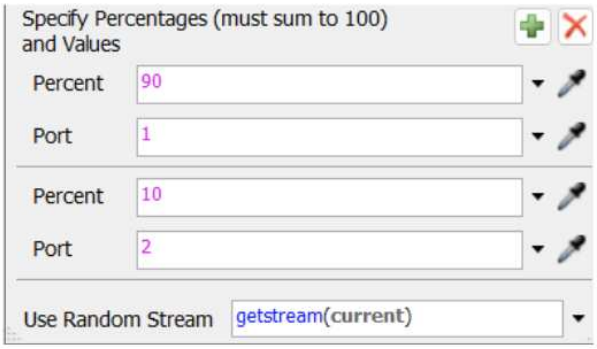

Figura 4.5: Configurazione del macchinario 1

Nella simulazione il **"sink"** ha la funzione di "cestino", nel quale tutti i pezzi scartati e non coformi vengono raccolti qui dentro.Non è neccessario alcun tipo di dimensionamento e poichè non esegue altre funzioni, esso gode di capacità illimitata.

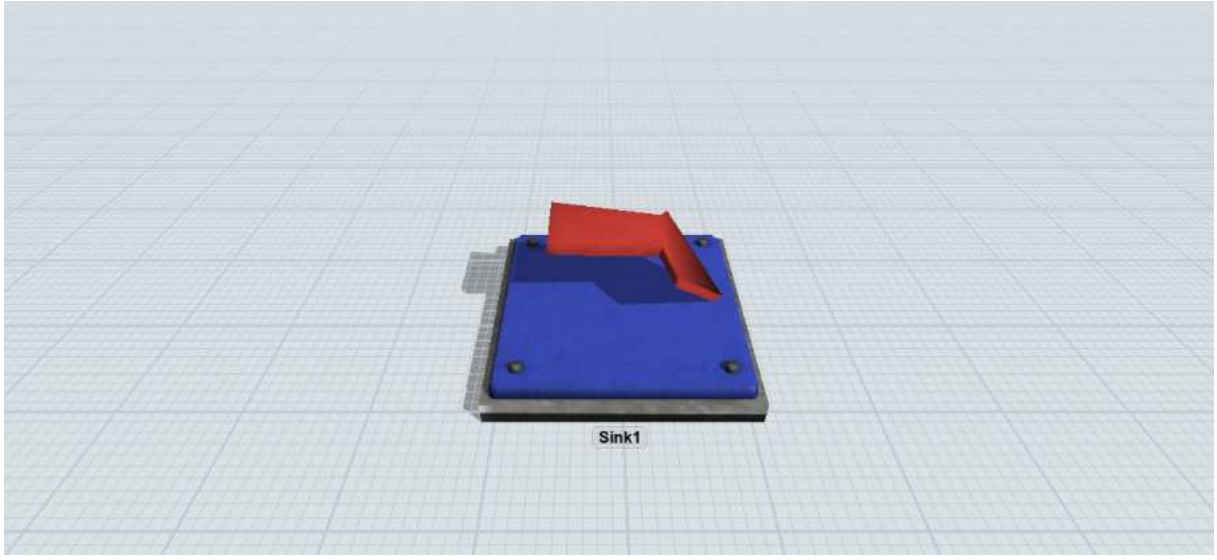

Figura 4.6: Rappresentazione grafica del Sink

4.2.1 Impostazioni dei buffer

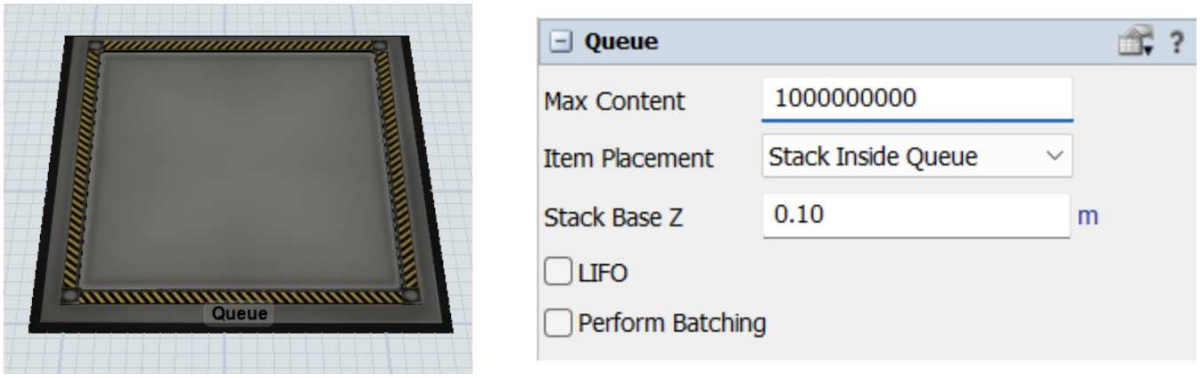

Figura 4.7: Buffer

Dopo aver inserito la funzione nelle posizioni desiderate, si è impostato la capacità dei diversi buffer nella sezione “Properties”→ “Queue”,settando il “Max Content” ovvero la capacità massima con un numero molto alto, in modo tale che non saturi, evitando così il fenomeno di blocking nei vari macchinari successivi.

Buffer	Capacità massima
1-2	300'000 Pz
2-3	45'000 Pz
3-4	44'000 Pz
4-5	145'000 Pz
5-6	**95'500 Pz**
6-7	165'000 Pz

Tabella 4.1: Tabella Capacità

Si evidenzia la riga del buffer 5-6 con una capacità di 95'500 Pz in quanto successivamente, **variando questa capacità si valuta il numero di pezzi in uscita allo stadio 7.**

Impostazione K2,K2,K4

Per inserire i suddetti coefficienti,abbiamo moltiplicato quest'ultimi dati in tabella 3.4, ottenendo un unico valore che condensa l'efficienza del macchinario, quella dell'operatore e quella dello stadio produttivo per i diversi macchinari. Il nuovo valore trovato, l'abbiamo impostato come MTBF MTBR nell'apposita sezione che si trova nel Toolbox (figura 4.8.

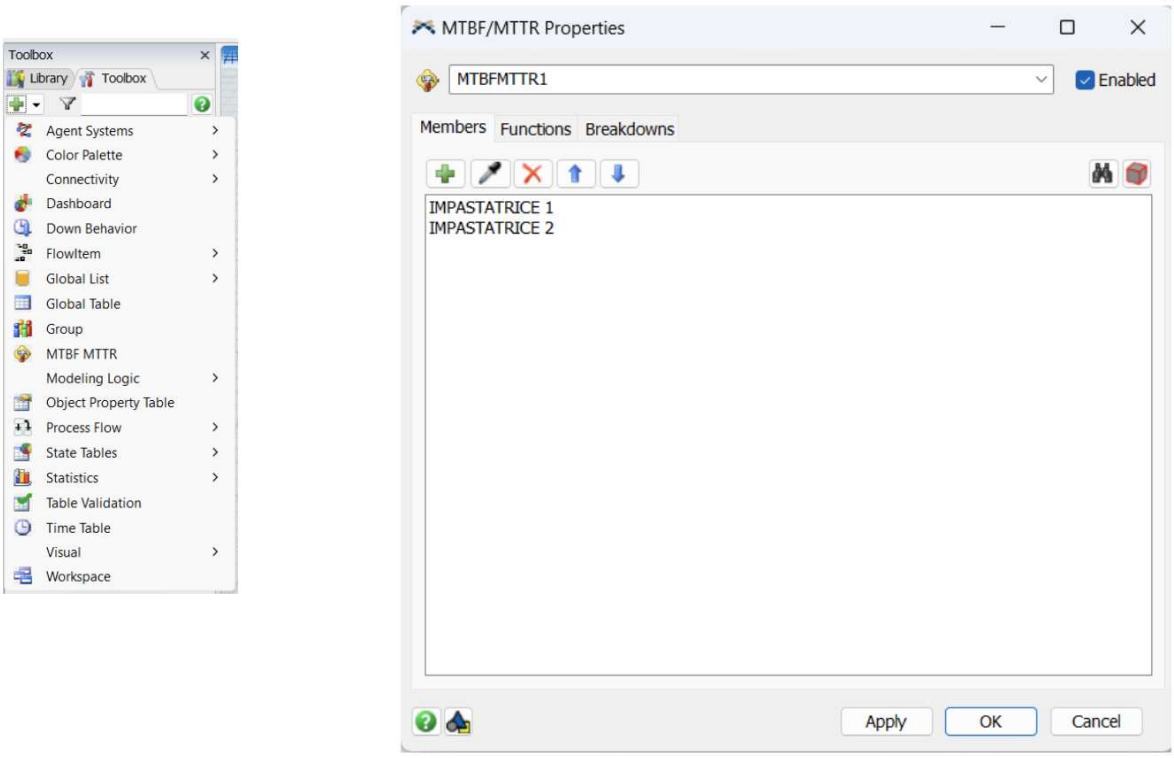

Figura 4.8: Toolbox e MTBF,MTBR

Dopo aver selezionato il macchinario desiderato, si usa la sezione Function (Figura 4.8) e si impostano i valori trovati del nuovo **"coeff. globale"** (moltiplicazione di K2,K3,K4) usando i valori in percentuale dividendoli in intervalli di uptime e downtime. Ad esempio nei 2 macchinari del primo stadio produttivo, avrò una percentuale di uptime del 72.471% e una di downtime del 27.53%. Ripeto il procedimento aggiungendo un nuovo MTBF MTBR per ogni macchinario di ogni stadio produttivo.

4.3 Inizio della simulazione

In primis, si imposta la finestra temporale in cui si analizza tutta la simulazione. Attraverso l'apposita sezione in alto (visibile in figura4.9) si seleziona il tempo finale della prova. Si è selezionato un'orizzonte temporale di un'ora per le diffioltà riscontrate nel modello simulativo nel simulare il processo produttivo preso in esame.Pertanto, nonostante la necessità di dover simulare un'orizzonte temporale piu lungo (almeno una giornata di 8 ore lavorative) si è scelto di utilizzare un'ora come campione iniziale per poter avere alcune informazioni preliminari sui profili di riempimento e svuotamento dei buffer nella linea. Come prospettiva futura di questa simulazione, sarà comunque necessario simulare almeno una giornata lavorativa intera.

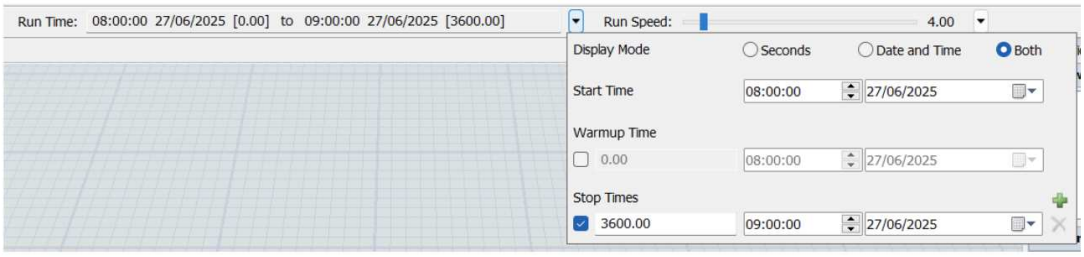

Figura 4.9: Finestra temporale della simulazione

La linea automatica in esame su Flexim è riporata in figura 4.10

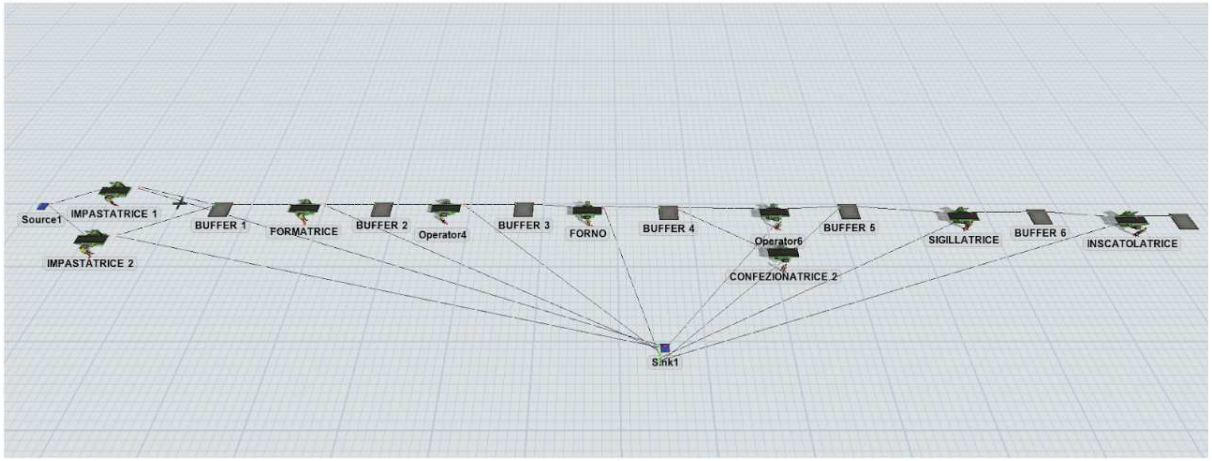

Figura 4.10: Linea automatica riportata su Flexim

4.3.1 Grafici

Per quanto riguarda l'impostazione dei grafici,si passa alla sezione **Dashboard** e aggiunge un **pannello di controllo** in modo tale da confrontare il contenuto dei vari buffer nel tempo usando l'apposita funzione **"Content"**. (Figura 4.11) e selezionando uno schema a **Line Chart** per ogni buffer.

La fase di settaggio di ogni buffer avviene tramite la sezione **"Properties"** , cliccando il tasto "+" verde e selezionando il buffer di interesse.

Oltre a questo si aggiunge un ulteriore grafico che mostra **l'output finale della linea.** In Figura 4.12 si nota la schermata del programma, e premendo il tasto "Run" in alto a sinistra si avvia la simulazione.

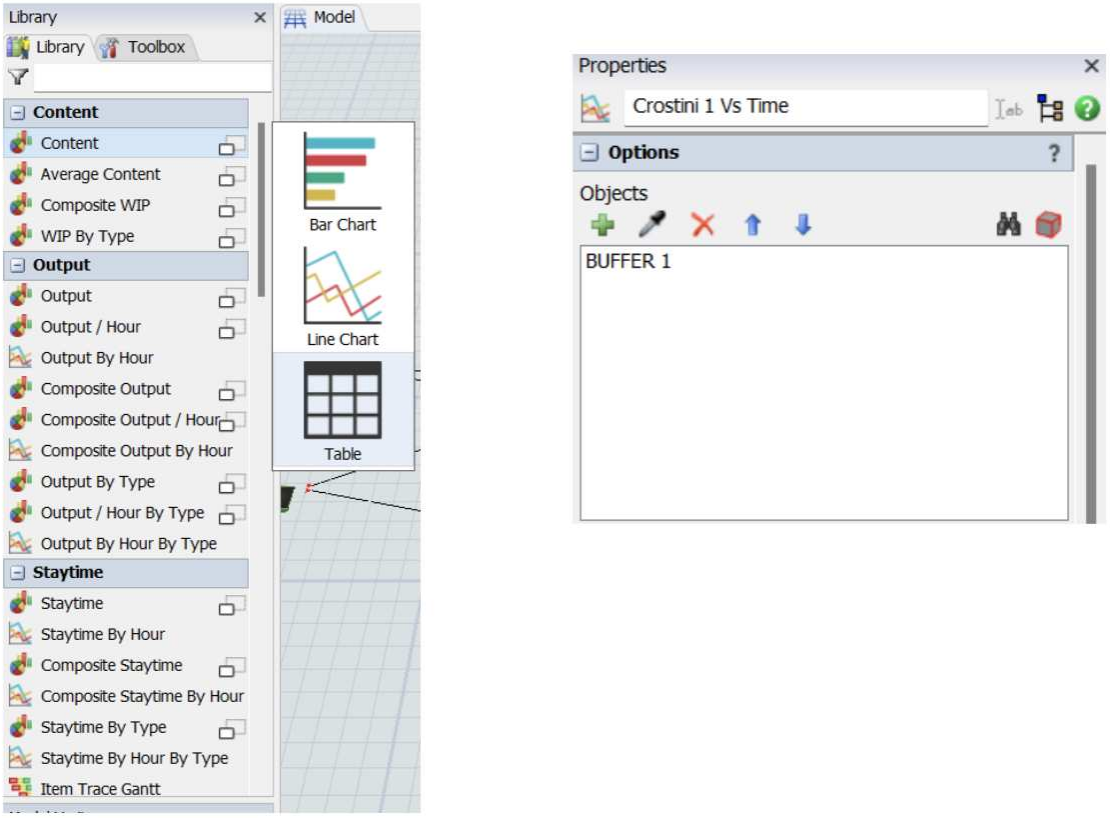

Figura 4.11: Sezione "Properties" per le impostazioni di ogni buffer

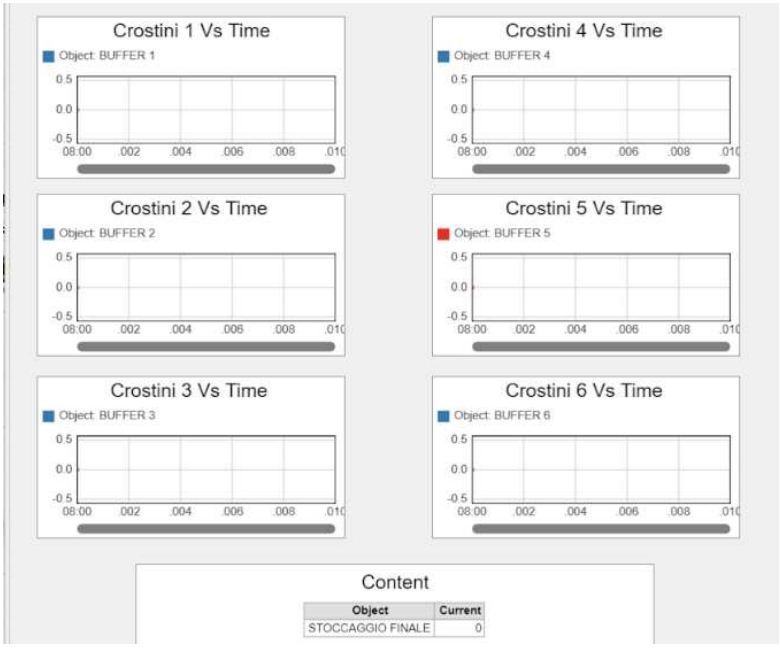

Figura 4.12: Grafici per ogni buffer

Alla fine della prova (della durata di un'ora) sono stati ottenuti i grafici riportati nelle figure 4.13 - 4.18. In particolare, è stato osservato che il buffer 5 risultava sovradimensionato. La capacità iniziale, pari a 95.500 pezzi (valore determinato nel foglio di calcolo), non veniva mai raggiunta nel corso delle simulazioni. Questo comportamento, in ambito industriale, si traduce in uno spreco di spazio e di risorse, con potenziali impatti economici negativi. A partire da tale osservazione, è stata avviata una fase di ottimizzazione, in cui la capacità del buffer è stata ridotta progressivamente. Si è infine scelto di impostare la capacità a 1.000 pezzi, valore a cui il buffer tende a saturarsi più frequentemente. Questo comporta una riduzione dell'output finale e un rallentamento della linea a monte, che si traduce in una maggiore occupazione dei buffer precedenti, in particolare il buffer 4. Tuttavia, tale configurazione risulta più ottimizzata dal punto di vista dell'impiego dello spazio, come mostrato nelle figure 4.19 - 4.24.

le figure 4.13 - 4.18 rappresentano l'andamento nel tempo dei crostini nei relativi buffer (con la dimensione del buffer 5 posta a 95'500 Pz).

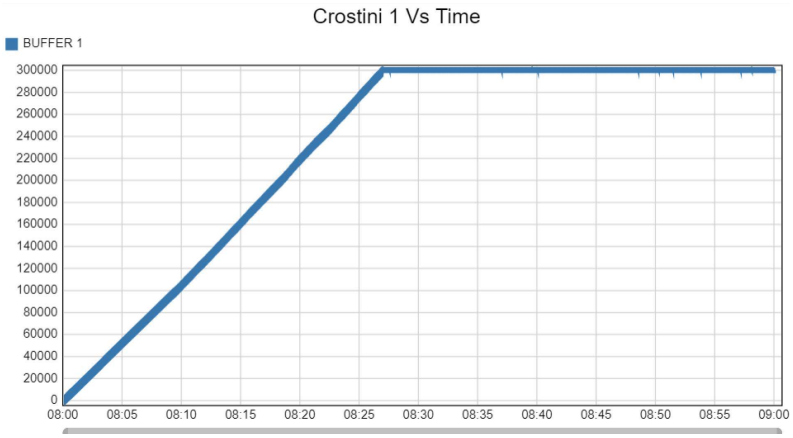

Figura 4.13: Andamento nel tempo dei crostini nel buffer 1 (prima ora di lavoro)

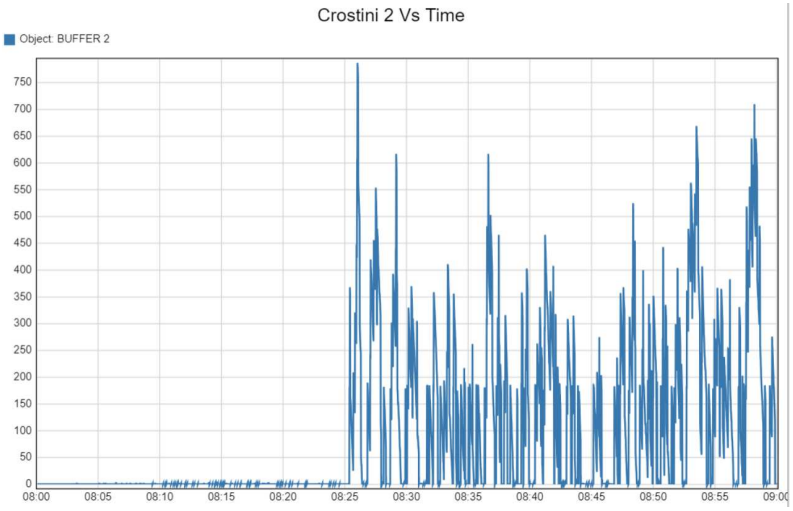

Figura 4.14: Andamento nel tempo dei crostini nel buffer 2 (prima ora di lavoro)

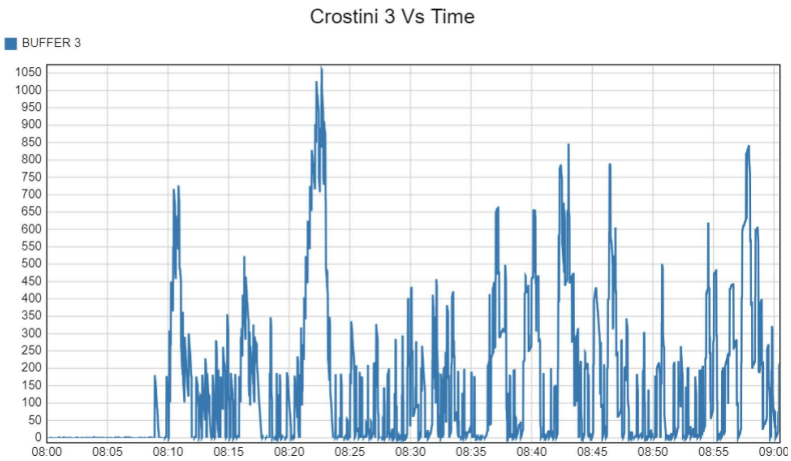

Figura 4.15: Andamento nel tempo dei crostini nel buffer 3 (prima ora di lavoro)

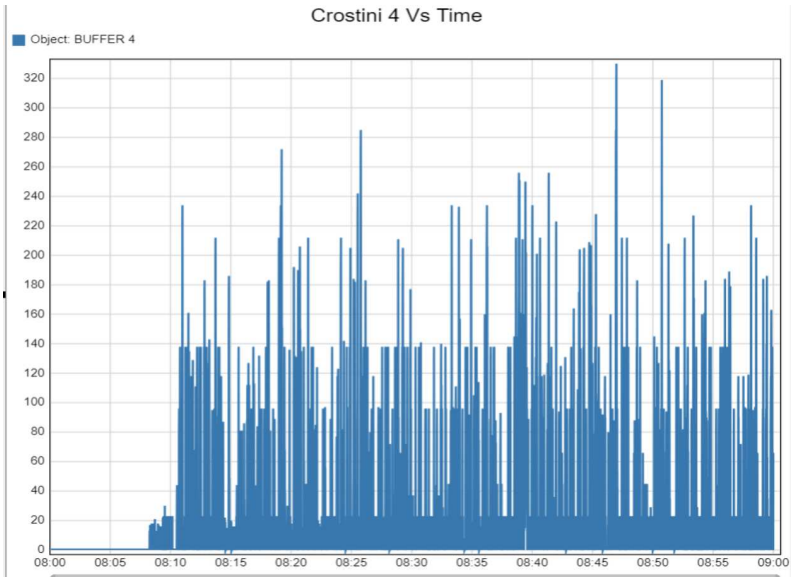

Figura 4.16: Andamento nel tempo dei crostini nel buffer 4 (prima ora di lavoro)

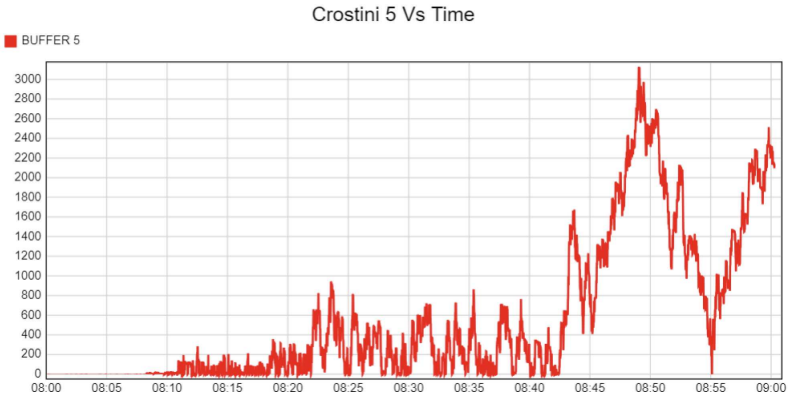

Figura 4.17: Andamento nel tempo dei crostini nel buffer 5 (prima ora di lavoro)

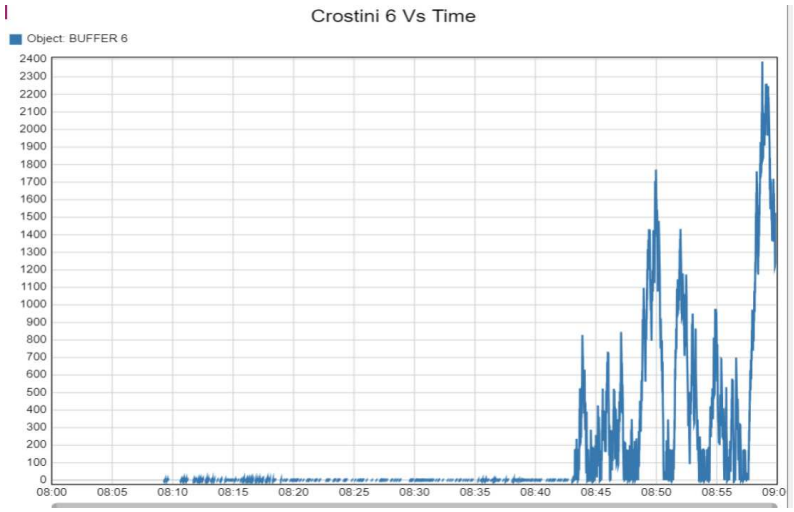

Figura 4.18: Andamento nel tempo dei crostini nel buffer 6 (prima ora di lavoro)

Le figure 4.19 - 4.24 rappresentano l'andamento nel tempo dei crostini nei relativi buffer (con la dimensione del buffer 5 posta a 1000 Pz).

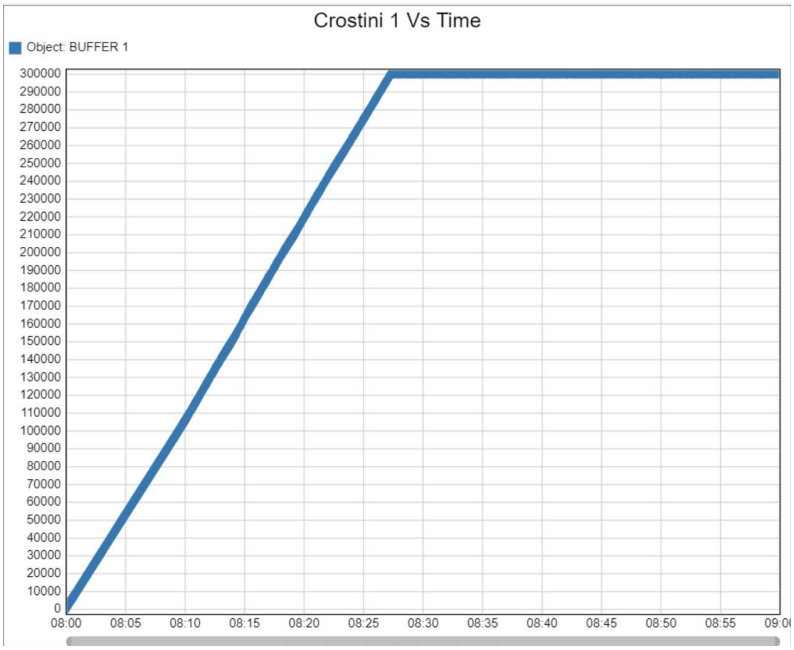

Figura 4.19: Andamento nel tempo dei crostini nel buffer 1 (prima ora di lavoro)

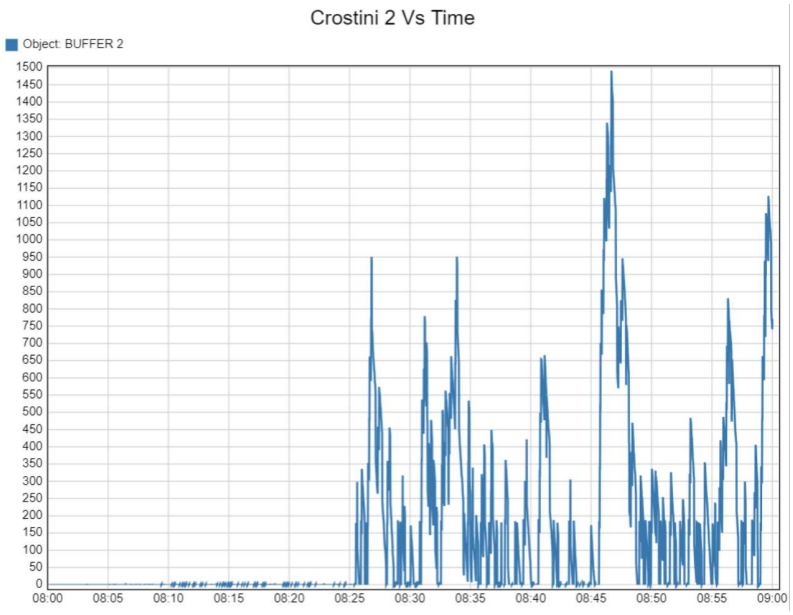

Figura 4.20: Andamento nel tempo dei crostini nel buffer 2 (prima ora di lavoro)

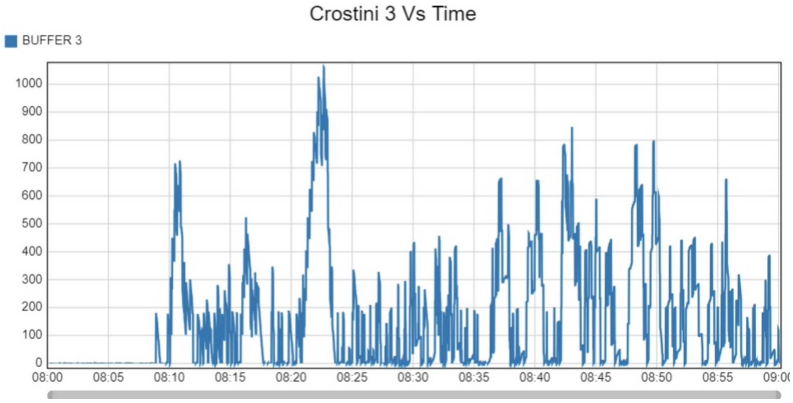

Figura 4.21: Andamento nel tempo dei crostini nel buffer 3 (prima ora di lavoro)

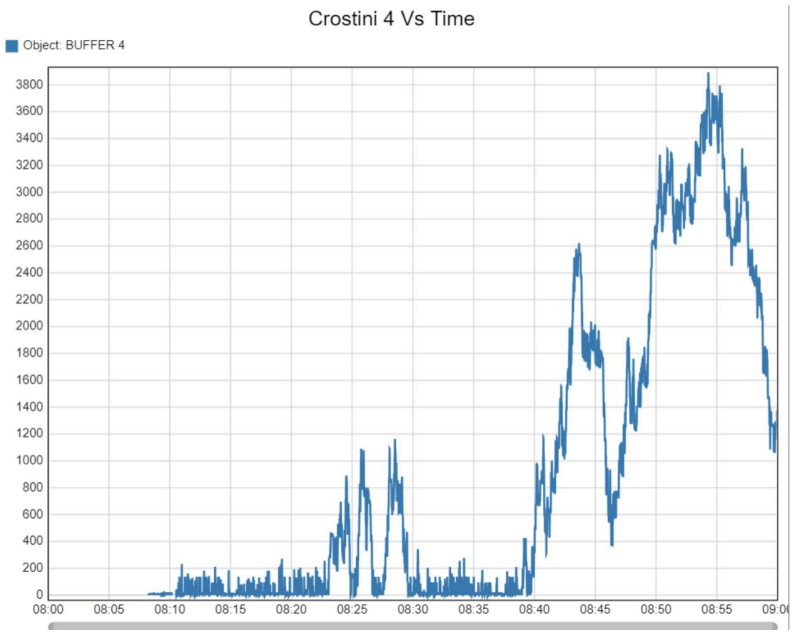

Figura 4.22: Andamento nel tempo dei crostini nel buffer 4 (prima ora di lavoro)

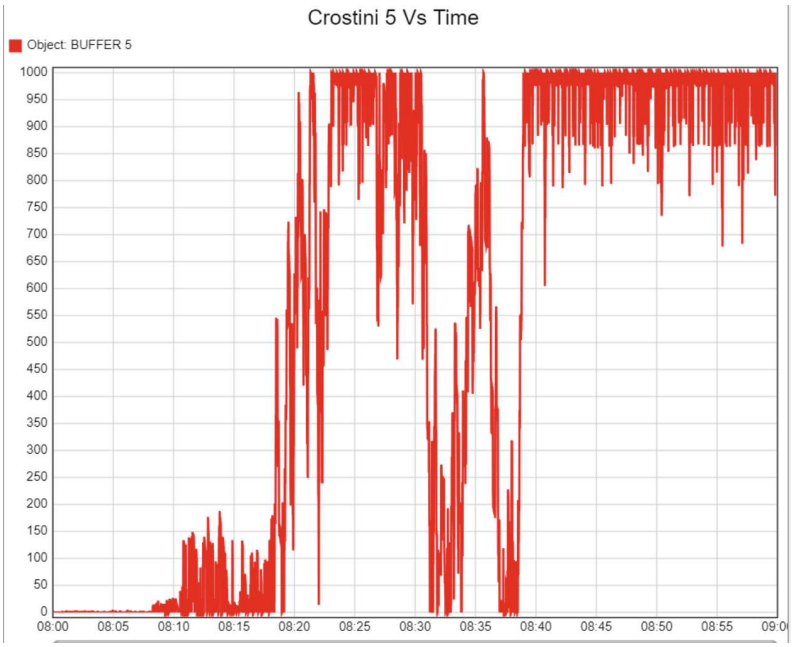

Figura 4.23: Andamento nel tempo dei crostini nel buffer 5 (prima ora di lavoro)

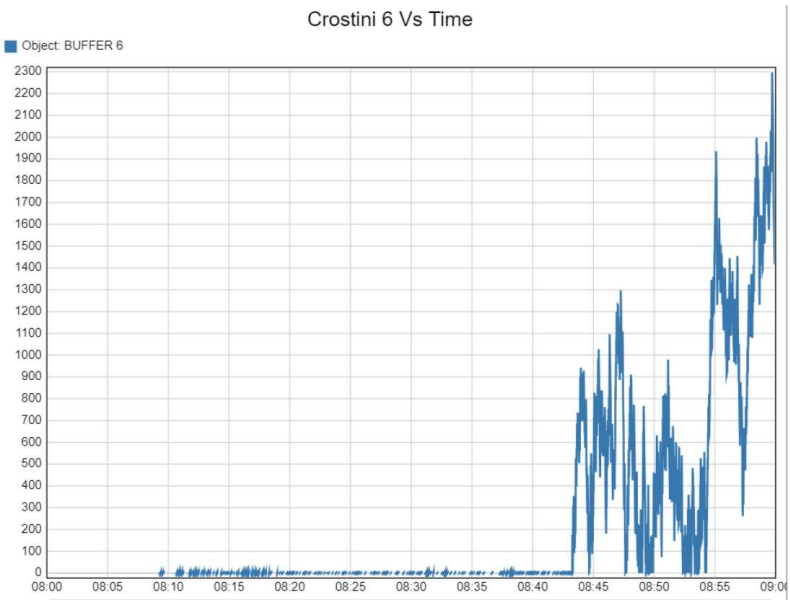

Figura 4.24: Andamento nel tempo dei crostini nel buffer 6 (prima ora di lavoro)

Capitolo 5

Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stato affrontato il problema del dimensionamento di una linea automatica asincrona per la produzione di crostini, con particolare attenzione alla gestione dei buffer tra le varie fasi del processo.
Si è iniziato con l'applicazione del metodo dei calcoli diretti, un approccio piuttosto comune che ha permesso di stimare la capacità produttiva di ogni stadio e di capire quanti macchinari fossero necessari per soddisfare la domanda.
Durante l'analisi è emerso che le fasi più critiche risultano essere l'impastamento e il confezionamento, poiché mostrano coefficienti di utilizzo sensibilmente inferiori rispetto agli altri stadi della linea, rendendole potenziali colli di bottiglia. Questo aspetto diventa ancora più rilevante nel caso in cui si voglia aumentare la produzione, perché proprio queste stazioni rischiano di causare inefficienze se non adeguatamente potenziate o supportate.
Uno dei buffer su cui ci si è concentrati maggiormente è quello tra la cottura e il confezionamento, che rappresenta un punto particolarmente delicato a causa del salto produttivo tra le due fasi e delle loro diverse caratteristiche operative, ma l'analisi complessiva ha mostrato che anche altri buffer, come quelli posti alle estremità della linea, giocano un ruolo importante nel garantire stabilità al sistema.
Per quanto riguarda il dimensionamento dei buffer, sono stati messi a confronto due approcci: il metodo del serbatoio, semplice e utile nelle fasi iniziali di progettazione, e un metodo basato sulla distribuzione dei downtime, più complesso ma anche più realistico. Quest'ultimo ha permesso di ottenere stime più prudenti e vicine al comportamento reale della linea, tenendo conto delle interruzioni e della variabilità.
È emerso inoltre che, in alcuni casi, l'introduzione di un secondo macchinario in una certa posizione può essere più efficace dell'aumento della capacità del buffer stesso. Per validare le ipotesi fatte, è stata utilizzata una simulazione con il software FlexSim, che ha richiesto un certo impegno nella fase di configurazione, ma ha permesso di osservare il comportamento dinamico della linea e di verificare la coerenza con quanto era stato ipotizzato a livello teorico. I risultati ottenuti dalla simulazione hanno confermato in buona parte le criticità individuate, ma hanno anche evidenziato l'importanza di combinare analisi sta-

tiche e simulazioni dinamiche per avere una visione più completa e affidabile del sistema. In conclusione, questo lavoro ha permesso di esplorare i punti di forza e le limitazioni dei principali metodi di dimensionamento e ha messo in evidenza l'utilità della simulazione come strumento di supporto alla progettazione, mostrando come un approccio integrato possa rappresentare una strategia efficace per affrontare la progettazione di linee asincrone in modo flessibile, efficiente e adattabile ai cambiamenti produttivi.

Bibliografia

- Chomnawung, Y., Prombanpong, S.,& Klavohm, C. (2016). A Buffer Analysis in a Transfer Production Line. In MATEC Web of Conferences (Vol. 68, p. 06005). EDP Sciences.

- Battini, D., Persona, A., & Regattieri, A. (2009). Buffer size design linked to reliability performance: A simulative study. Computers & Industrial Engineering, 56(4), 1633-1641.

- Lakerveld, R., Benyahia, B., Heider, P. L., Zhang, H., Braatz, R. D., & Barton, P. I. (2013). Averaging level control to reduce off-spec material in a continuous pharmaceutical pilot plant. Processes, 1(3), 330-348.

- Pareschi, A. (2019). Impianti Industriali. Criteri di scelta, progettazione e realizzazione. Società Editrice Esculapio.

- J. A. Buzacott,"Automatic Transfer Lines with Buffer Stocks," International Journal of Production Research, Vol. 5, No.3, pp. 183-200. (1967).

- S. Prombanpong, J. Kaewyu, N. Thanadulthaveedech, and M. Matwangsang." A Buffer Design for Mitigation Downtime Effect in an Automated Transfer Line", International Journal of Innovation, Management and Technology, vol.4, pp. 155-158.(2013).

- F. S. Hillier and K. C So, "The effect of machine breakdown and internal storage on the performance of production line systems", International Journal of Production Research, vol. 29, pp. 2043-2055, (1991).

- J. Wijngaard," The effect of inter-stage buffer storage on the output of two unreliable production units in series, with different production rates," AIIE Transaction,vol. 11, no.1,(1979).

- E. Enginarlar, J. L, Semyon, M. Meerkov, and R. Q.,Zhang, " Buffer capacity for accommodating machine downtime in serial production lines, International Journal of Production Research, vol. 40, no. 3, pp 601-624, (2002).