



**Politecnico
di Torino**

Collegio di Ingegneria Gestionale e della Produzione

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Gestionale**

Tesi di Laurea Magistrale

**Simulazione e analisi di un flow shop con controllo
dinamico della produzione**

Relatori

Alfieri Arianna

Castiglione Claudio

Pastore Erica

Candidata

Filattiera Francesca

Marzo 2026

INDICE

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | INTRODUZIONE | 1 |
| 2 | METODOLOGIA ADOTTATA | 3 |
| 3 | STRUTTURA DEL LAVORO | 5 |
| 4 | RIFERIMENTI DALLA LETTERATURA | 6 |
| 4.1 | <i>Sistemi produttivi e dinamiche di flusso</i> | 6 |
| 4.2 | <i>Sistema kanban, routing dinamico e deadlock</i> | 7 |
| 4.3 | <i>Indicatori di performance nei sistemi produttivi</i> | 8 |
| 4.4 | <i>Segmenti di ricerca</i> | 9 |
| 5 | ANALISI DEL SISTEMA PRODUTTIVO | 11 |
| 5.1 | DESCRIZIONE DEL PROCESSO REALE: LAYOUT E FLUSSI | 11 |
| 5.2 | LOGICHE DI CONTROLLO | 17 |
| 5.2.1 | <i>Sistema pull e kanban</i> | 17 |
| 5.2.2 | <i>Routing dinamico e deadlock prevention</i> | 20 |
| 6 | PROGETTAZIONE DEGLI SCENARI SPERIMENTALI | 22 |
| 6.1 | ASSUNZIONI MODELLISTICHE | 22 |
| 6.2 | SCENARIO BASE | 24 |
| 6.3 | INDICATORI CHIAVE DI PERFORMANCE | 25 |
| 6.4 | CONFIGURAZIONE DEGLI SCENARI SPERIMENTALI | 26 |
| 7 | RISULTATI, DISCUSSIONE E CONCLUSIONI | 28 |
| 7.1 | ANALISI DELLE PERFORMANCE DELLO SCENARIO BASE | 28 |
| 7.2 | CONFRONTO TRA SCENARI SPERIMENTALI | 33 |
| 7.3 | CONCLUSIONI | 38 |
| 7.4 | LIMITI DEL LAVORO | 41 |
| 7.5 | PROPOSTE PER SVILUPPI FUTURI | 42 |
| | BIBLIOGRAFIA | 43 |
| | APPENDICE | 45 |
| A. | MODELLO ARENA | 45 |
| A.1 | <i>Architettura generale del modello</i> | 45 |
| A.2 | <i>Implementazione delle logiche di controllo</i> | 50 |
| A.3 | <i>Parametri della simulazione</i> | 52 |
| B. | REPORT DEGLI ESPERIMENTI | 53 |

1 Introduzione

I processi manifatturieri hanno subito una profonda trasformazione trainata dall'avvento del lean manufacturing e dei sistemi just-in-time. In particolare, la crescente complessità dei sistemi produttivi ha reso necessario lo sviluppo di strategie di controllo più flessibili ed efficienti rispetto alle politiche tradizionali. Nei casi in cui emerge la necessità di avere sistemi di produzione flessibili, gli stabilimenti sono spinti a riorganizzarsi secondo la logica pull con l'obiettivo di aumentare l'efficienza e rispondere alle sfide del mercato. Rispetto alle logiche tradizionali, infatti, i sistemi pull prediligono la riduzione degli sprechi, del WIP e dei costi di immagazzinamento e l'aumento della flessibilità a svantaggio dei tempi di risposta agli ordini cliente. Dal momento che la flessibilità e la reattività della produzione si traduce in una fonte di vantaggio competitivo per l'impresa in qualunque settore industriale, l'ottimizzazione dei sistemi produttivi diventa un aspetto fondamentale sia dal punto di vista operativo che strategico.

Dal punto di vista scientifico, molti studi analizzano singolarmente strumenti pull come kanban, routing dinamico o meccanismi di deadlock prevention, ma sono rari i contributi che li esaminano congiuntamente in sistemi con ricircoli multipli e vincoli di trasporto. Inoltre, in molti contesti produttivi moderni, la crescente complessità dei flussi, l'introduzione di prodotti con cicli di lavorazione eterogenei e la variabilità operativa generano fenomeni di congestione, ricircoli e instabilità dei tempi di attraversamento. Questi aspetti rendono critica la progettazione di sistemi di controllo in grado di coordinare efficacemente il flusso di materiali. Questo lavoro si inserisce in tale spazio di ricerca, proponendo una gestione efficace ed efficiente di un layout complesso e un'analisi integrata di logiche di controllo della produzione e dei flussi.

Questo lavoro studia l'applicazione di logiche di controllo dinamico ad un sistema di produzione per valutare gli impatti di una tale gestione su prestazioni del sistema stesso quali throughput, WIP, tempo di attraversamento e saturazione delle macchine. In particolare, si studia come il comportamento di sistemi produttivi con ricircoli multipli e capacità di trasporto limitata evolva al variare del livello di autorizzazione alla produzione per comprendere se e in che misura le logiche di controllo dinamico possano migliorare

la fluidità dei flussi, mitigare fenomeni di congestione e supportare una gestione più efficiente in sistemi produttivi complessi.

2 Metodologia adottata

Il sistema di produzione in analisi è stato modellato e simulato in Arena Rockwell, un simulatore con ampio utilizzo in ambito accademico e industriale che permette di riprodurre fedelmente il comportamento di un sistema reale e analizzarlo in diverse condizioni.

Su Arena, quindi, è stato modellato il flow shop con i suoi elementi fisici (approvvigionamento dei materiali, arrivo degli ordini cliente, stazioni, macchine, controllo qualità, conveyor e nodi di routing) e le logiche di controllo (deadlock prevention, routing alternativo, pull e kanban). La metodologia adottata consiste in un processo iterativo di verifica della coerenza del modello rispetto al sistema reale. In particolare, dopo una prima implementazione della struttura logica e delle regole di controllo, il modello è stato sottoposto a una serie di test preliminari per validare il corretto funzionamento dei flussi, delle condizioni decisionali e delle dinamiche di ricircolo. Questa fase ha permesso di individuare eventuali comportamenti anomali dovuti alla complessità del layout o all'interazione tra routing dinamico, loop del conveyor e logiche di deadlock prevention, consentendo di apportare modifiche incrementali prima della fase di sperimentazione vera e propria.

Congiuntamente, è stata posta particolare attenzione alla definizione delle metriche utili per la valutazione quantitativa delle prestazioni. La selezione degli indicatori è stata guidata sia dalla letteratura sia dalle peculiarità del sistema analizzato, includendo misure strettamente legate all'efficienza operativa (throughput, tempi di attraversamento), alla gestione delle risorse (saturazione delle macchine e dei tratti di conveyor) e alla stabilità del flusso (livelli medi e variabilità del WIP). L'integrazione tra analisi numerica e osservazioni qualitative ha permesso di interpretare in modo più completo il comportamento del sistema e di confrontare in modo robusto gli scenari sperimentali.

L'analisi segue un approccio comparativo: tutte le configurazioni studiate mantengono costanti layout, parametri di processo e logiche di controllo, variando esclusivamente il livello di autorizzazione alla produzione tramite cartellini kanban. Ciò garantisce che gli effetti osservati siano direttamente attribuibili alla variabile sperimentale selezionata, permettendo di valutarne con chiarezza l'impatto sul

funzionamento complessivo del flow shop. Inoltre, l'analisi dei report generati dal simulatore per ciascuno scenario simulato è supportata da un processo di trasformazione dei dati grezzi ottenuti, da valutazioni di tipo qualitativo sulla consistenza dei dati e dall'utilizzo di grafici.

3 Struttura del lavoro

Dopo una panoramica generale sull'argomento trattato, sul contesto applicativo e sull'approccio metodologico seguito, questa tesi si struttura in sezioni come segue.

Nel Capitolo 4 sono riportati studi tratti dalla letteratura con l'obiettivo di individuare un perimetro di analisi e riconoscere un segmento di studio non ancora investigato. Successivamente, nel Capitolo 5 si procede alla descrizione del sistema produttivo in esame con gli elementi fisici, progettativi e logici di cui è composto e nel Capitolo 6 si descrive la progettazione degli scenari di confronto. Infine, nel Capitolo 7 si presenta l'analisi degli output generati in ogni scenario e il loro confronto, la discussione dei risultati e la proposta di eventuali passi futuri. A seguire è riportata la Bibliografia e l'Appendice dove si trovano la descrizione e alcune immagini del modello simulativo e i principali output generati dal simulatore e analizzati.

4 Riferimenti dalla letteratura

La letteratura scientifica sui sistemi produttivi è estremamente vasta e affronta numerosi aspetti legati alla gestione dei flussi, alle logiche di controllo e alle prestazioni operative. In questo lavoro, la selezione dei contributi di riferimento è stata effettuata seguendo criteri precisi: sono stati considerati gli studi che analizzano flow shop con ricircoli, conveyor a loop chiuso, sistemi pull e kanban, routing dinamico e strategie di deadlock prevention. La scelta di focalizzarsi su questi ambiti deriva dalla necessità di individuare un insieme di lavori che affrontino, almeno parzialmente, le stesse dinamiche presenti nel sistema oggetto di studio: un sistema flow shop caratterizzato da ricircoli multipli, controllo pull mediante cartellini kanban, routing dinamico e prevenzione del deadlock. In questo modo si evidenzia ciò che è stato già esplorato e, soprattutto, quali aspetti risultano ancora poco investigati o non integrati in maniera congiunta.

4.1 Sistemi produttivi e dinamiche di flusso

I sistemi produttivi sono stati storicamente classificati in funzione della varietà del prodotto e del volume produttivo, distinguendo tra produzione per progetto, su commessa, job shop, produzione a lotti e flow shop (Davis & King, 1975; Hopp & Spearman, 2011). Gli studi concordano nel ritenere il job shop più flessibile ma complesso da gestire, mentre il flow shop risulta più lineare e standardizzato.

Tuttavia, molti contributi mettono in luce che questa apparente linearità viene meno in presenza di variabilità, ricircoli o vincoli di trasporto, condizioni che rendono il flusso tutt'altro che stabile o bilanciato. La letteratura che affronta le dinamiche di flusso in sistemi complessi evidenzia come la presenza di segmenti di trasporto, capacità limitate e routing articolato generi fenomeni di congestione e non linearità nei tempi di attraversamento (Graves et al., 1995; Zhang et al., 2009; Soukhal et al., 2005). In particolare, gli studi sui conveyor mostrano che i sistemi a loop chiuso possono sviluppare comportamenti fortemente dinamici: la velocità del nastro, la disposizione delle stazioni e l'interazione con i flussi di ritorno influenzano profondamente WIP e throughput (Muth, 1972; Bozer & Hsieh, 2005). Nonostante questi contributi analizzino layout e vincoli fisici, non considerano l'impatto congiunto di logiche di controllo avanzate, logiche pull e sistemi kanban.

Il sistema pull rappresenta uno dei paradigmi più consolidati nella letteratura moderna sui sistemi produttivi. Numerosi studi mostrano come la produzione attivata dalla domanda consenta di ridurre il WIP, limitare le attese e aumentare la flessibilità operativa (Hopp & Spearman, 2011; Sugimori et al., 1977). Il kanban, principale meccanismo operativo del pull, è stato oggetto di molte ricerche che ne confermano la capacità di sincronizzare le fasi di produzione, stabilizzare il flusso e ridurre gli sprechi (Berkley & Kiran, 1991; Thürer et al., 2015).

Una parte della letteratura, tendenzialmente concorde, evidenzia i benefici ottenibili in termini di efficienza e visibilità del processo (Gupta & Jain, 2013; Palange & Dhattrak, 2021). Altri studi, invece, mostrano limiti e possibili effetti indesiderati del kanban, soprattutto in contesti caratterizzati da variabilità elevata o da condizioni operative non stazionarie: la rigidità dei cartellini può infatti ridurre la capacità di assorbire fluttuazioni o portare a temporanei sbilanciamenti del sistema (Pažek, 2021). Tali posizioni divergenti suggeriscono che l'efficacia del kanban dipende fortemente dall'ambiente produttivo e dall'interazione tra controllo del flusso, variabilità e vincoli strutturali.

4.2 Sistema kanban, routing dinamico e deadlock

Un elemento meno approfondito riguarda il ruolo del kanban nei sistemi con ricircoli multipli. Alcuni autori suggeriscono che esso possa agire anche come meccanismo implicito di deadlock prevention grazie al limite sul numero di entità circolanti (Hopp & Spearman, 2011), ma tali indicazioni derivano in gran parte da modelli lineari o da sistemi con buffer intermedi: mancano studi su configurazioni che, come nel caso trattato, vedono l'assenza di buffer e una forte dipendenza dalla capacità del conveyor a loop chiuso, routing dinamico e deadlock.

Il routing rappresenta un altro tema centrale nella produzione industriale. La letteratura ha affrontato prevalentemente routing statico o deterministico, mentre il routing dinamico viene trattato soprattutto in studi che analizzano sistemi affetti da congestione o soggetti a elevata variabilità (Zhang et al., 2009). I modelli indicano che la capacità del trasporto, la priorità dei flussi e la configurazione dei nodi influenzano sensibilmente l'efficienza complessiva. La letteratura propone criteri di dispatching che

tengono conto di prossimità, congestione locale e riduzione dei cicli di ritorno, con benefici soprattutto nei segmenti del conveyor prossimi allo stadio col collo di bottiglia.

Parallelamente, l'analisi del deadlock è stata affrontata in modo approfondito nei lavori che utilizzano modelli a reti di Petri (Viswanadham et al., 1990). Le strategie di prevenzione sono ben documentate, ma spesso applicate a contesti con buffer intermedi e senza ricircoli importanti. Mancano invece contributi che combinino deadlock prevention con sistemi pull, conveyor a loop chiuso e routing dinamico basato su condizioni locali.

Parte della letteratura è concorde nel riconoscere che la formazione di deadlock è un problema globale, non locale: anche controlli ben progettati possono fallire se valutati solo sul singolo nodo (Viswanadham et al., 1990).

4.3 Indicatori di performance nei sistemi produttivi

Gli indicatori di performance sono ampiamente discussi nella letteratura sulla gestione dei sistemi produttivi. KPI quali throughput, tempo di attraversamento, tempo di ciclo, WIP e saturazione delle risorse costituiscono il linguaggio comune con cui valutare l'efficienza operativa (Zhu et al., 2017; Hester et al., 2017). Gli studi concordano sul fatto che tali misure non vadano considerate singolarmente, poiché miglioramenti localizzati possono mascherare inefficienze sistemiche.

In presenza di ricircoli o routing non deterministico, diversi autori evidenziano la comparsa di comportamenti non lineari nei KPI, come variazioni improvvise del tempo di attraversamento o crescita non proporzionale del WIP rispetto alla capacità del sistema (Bozer & Hsieh, 2005). Alcuni lavori mostrano che minimizzare il WIP può ridurre la resilienza del sistema, mentre massimizzare il throughput può aumentare la probabilità di congestione: la ricerca mette quindi in luce un trade-off fra prestazioni difficilmente risolvibile in modo analitico (Bozer & Hsieh, 2005; Zhe et al., 2017).

Nonostante questa ampia base teorica, pochi studi analizzano come tali indicatori cambino quando logiche pull, kanban, routing dinamico e deadlock prevention interagiscono simultaneamente. In particolare, non è stata trovata letteratura che valuti l'effetto combinato di probabilità di invio a controllo qualità, rilavorazioni e looping su conveyor chiusi, variabili tutte presenti nel sistema in esame.

4.4 Segmenti di ricerca

In sintesi, dalla rassegna emerge un quadro ricco ma non completamente integrato: i contributi su flow shop, sistemi pull, kanban, conveyor a loop chiuso, routing dinamico e deadlock affrontano singoli aspetti del problema, ma non ne esaminano le interazioni. Le principali aree di approfondimento riguardano:

- Integrazione tra layout complessi e logiche di controllo avanzate. La maggior parte degli studi considera sistemi lineari o con routing semplice, mentre risultano meno investigati i contesti caratterizzati da ricircoli multipli e nodi di confluenza che influenzano in modo non lineare i flussi produttivi.
- Comportamento dei sistemi pull in condizioni di forte ricircolo. Il kanban è ampiamente analizzato, ma quasi sempre in condizioni operative stazionarie. Rimangono limitati i contributi che ne valutano gli effetti in presenza di flussi circolari, congestioni intermittenti e dinamiche di looping generate dal conveyor.
- Deadlock prevention in combinazione con logiche pull e routing dinamico. Sebbene esistano metodi consolidati per la gestione del deadlock, essi sono generalmente studiati in sistemi con buffer intermedi e routing deterministico, senza considerare l'effetto congiunto di logiche kanban e meccanismi di trasporto a capacità limitata.
- Interazione tra routing dinamico e dispositivi di sincronizzazione del flusso. La letteratura sul routing dinamico analizza scenari caratterizzati da variabilità e congestione, ma senza approfondire come questo tipo di controllo si comporti quando coesiste con segnali pull, priorità locali e vincoli di trasporto stringenti.
- Relazione fra numero di cartellini, throughput e stabilità del sistema. È poco investigato come la quantità di kanban influenzi simultaneamente saturazione del conveyor, WIP e tempi di attraversamento in un ambiente caratterizzato da ricircoli multipli e reinserimenti dovuti al controllo qualità.

Il presente lavoro si inserisce in questo contesto di ricerca poiché combina layout con conveyor a loop chiuso, logiche pull e kanban, routing dinamico basato su condizioni locali e deadlock prevention per analizzare in modo congiunto il comportamento del sistema. La valutazione sperimentale dei diversi livelli di autorizzazione alla produzione

consente, inoltre, di osservare come il sistema reagisca a condizioni operative variabili, offrendo una prospettiva che nella letteratura appare ancora limitata.

5 Analisi del sistema produttivo

5.1 Descrizione del processo reale: layout e flussi

Il sistema produttivo analizzato in questo lavoro di tesi è un flow shop gestito con logica pull, sistema kanban, logiche di deadlock prevention e routing dinamico.

Esso è composto da sei stazioni, di cui una è destinata al controllo qualità come mostrato in Figura 5.1.

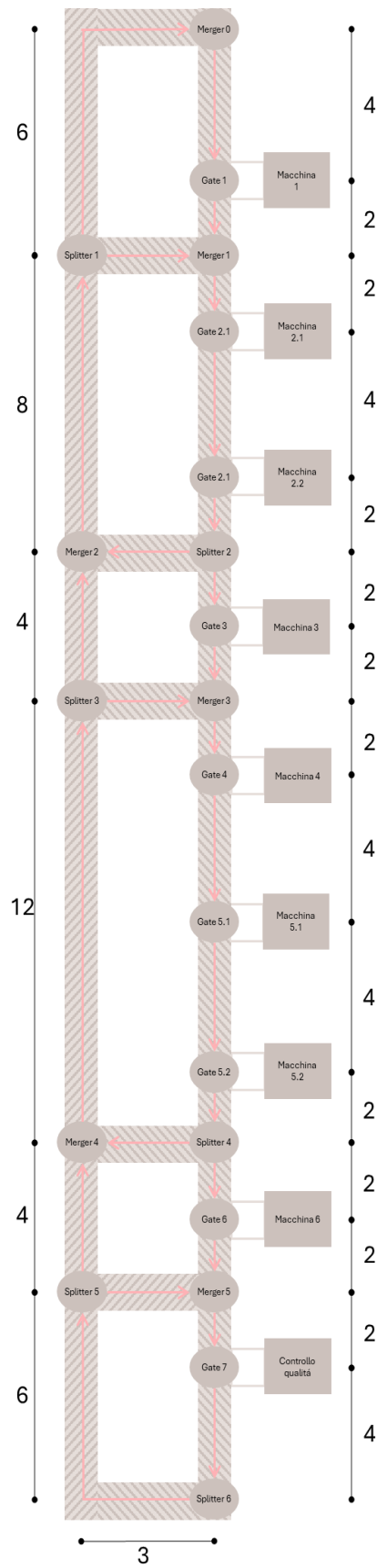


Figura 5.1: Layout del sistema produttivo in esame (distanze espresse in metri)

Ciascun pezzo segue la medesima sequenza di lavoro e le workstation sono disposte nell'ordine di lavorazione e dotate di una o due macchine in parallelo. La sequenza operativa di base è mostrata in Figura 5.2: in particolare, per la seconda fase sono disponibili due macchine identiche per un'unica lavorazione mentre la quinta fase prevede l'esecuzione di due lavorazioni da compiersi, indifferentemente, sulle due risorse in parallelo.



Figura 5.2: Sequenza di lavorazione

Nella Figura 5.3 è mostrato il flow chart del sistema produttivo in esame che viene descritto in seguito.

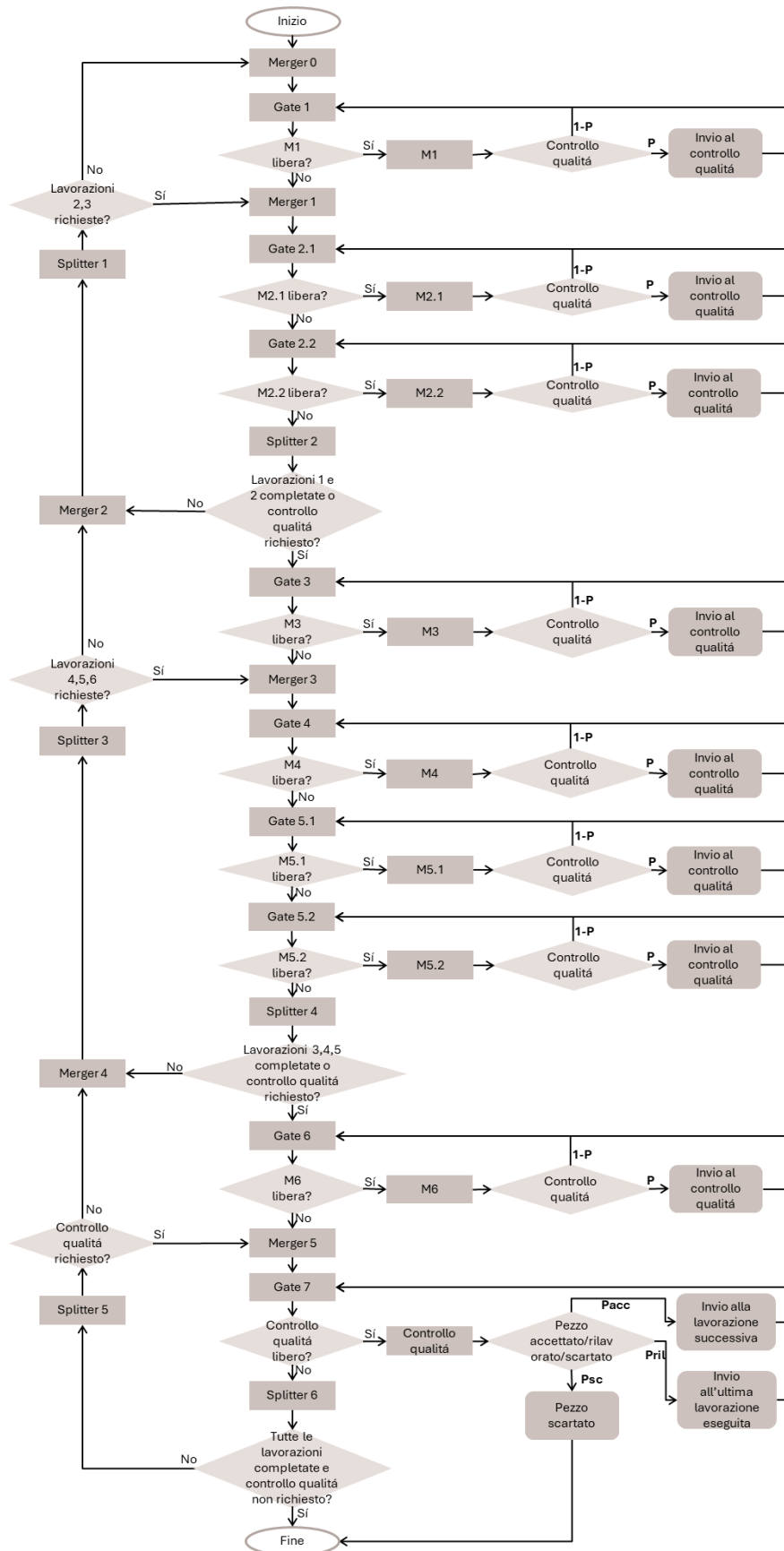


Figura 5.3: Flow chart del sistema produttivo in esame

Per semplificare il modello simulativo, ciascuna risorsa può lavorare un pezzo alla volta e ha un tempo di lavorazione deterministico tale da rendere la linea bilanciata. Nel caso di macchine identiche in parallelo, la lavorazione avviene su una delle due senza alcun ordine di priorità, purché libere. Al termine di ciascuna lavorazione, i pezzi sono inviati con una certa probabilità al controllo qualità posto a valle di tutte le altre stazioni. In questo caso, una volta concluso il controllo, il pezzo può essere accettato, rilavorato o scartato perché difettoso e non riparabile. Le unità che necessitano di essere rilavorate e quelle conformi riprendono il ciclo di produzione, rispettivamente, dall'ultima fase di trasformazione effettuata e dalla successiva mentre gli scarti escono dal sistema. Inoltre, ciascun pezzo può essere inviato al controllo qualità più volte, anche a partire della stessa fase produttiva.

Il flusso di materiale interno è guidato da un conveyor a loop chiuso con velocità costante. Tale nastro trasportatore consente di alimentare le workstation, indirizzare i pezzi attraverso i loop di circolazione quando una macchina è occupata e riportare a monte quelli che necessitano di ulteriori lavorazioni. Il conveyor è costituito da diversi segmenti rettilinei adiacenti. Ciascun segmento è delimitato da due punti, gate, merger o splitter. Il gate precede una macchina e in sua corrispondenza il pezzo viene scaricato dal conveyor e poi ricaricato al termine della lavorazione. Il merger è un nodo di confluenza di due segmenti del nastro mentre lo splitter è un punto di biforcazione. In entrambi questi ultimi due punti i segmenti adiacenti sono posti ad angolo retto. Tali tipologie di nodi, gate, merger o splitter, sono numerati progressivamente come mostrato precedentemente nelle Figure 5.2 e 5.3.

Non essendo presenti buffer intermedi tra le stazioni, nel caso in cui una macchina sia occupata, il pezzo che richiede quella lavorazione non resta in attesa ma viene instradato sul conveyor e attraverso un loop più o meno ampio resta in circolo fino al rilascio della risorsa. Questa dinamica, combinata con la presenza di una probabilità di invio al controllo qualità, determina uno sbilanciamento della linea nonostante i tempi di processo siano deterministici. Si creano, quindi, ricircoli multipli dei pezzi con conseguente aumento del tempo di attraversamento medio e del rischio di congestionamenti e deadlock.

I dati del sistema reale sono riportati nella Tabella 5.1.

Tabella 5.1: Parametri noti del sistema reale

| Parametro | | Valore |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------|
| Velocità del conveyor (v) | | 2 m/min |
| Tempo di processo macchine (t_{p,i}) | 1 | 20 min |
| | 2.1 | 40 min |
| | 2.2 | 40 min |
| | 3 | 20 min |
| | 4 | 20 min |
| | 5.1 | 20 min |
| | 5.2 | 20 min |
| | controllo qualità | 20 min |
| Probabilità di invio al controllo qualità (p) | | 15% |
| Probabilità di | rilavorazione (p_{ril}) | 70% |
| | scarto (p_{sc}) | 20 % |
| | accettazione (p_{acc}) | 10% |

La gestione della domanda e del materiale nel sistema produttivo in esame è progettata in modo da separare il meccanismo di generazione degli ordini cliente dalla regolazione del flusso interno dei pezzi. Gli ordini cliente rappresentano esclusivamente il segnale di attivazione della produzione e non sono soggetti a politiche di selezione o rifiuto: tutti gli ordini ricevuti sono accettati e presi in carico dal sistema.

A fronte della ricezione di un ordine cliente, il sistema attiva il prelievo del materiale a monte. Il materiale è approvvigionato singolarmente ed è reso immediatamente disponibile tramite un buffer logico di capacità illimitata, modellato al solo scopo di garantire l'assenza di vincoli di fornitura. Tale buffer non svolge, quindi, una funzione di accumulo operativo, ma assicura che la disponibilità del materiale non rappresenti un fattore limitante per l'analisi delle dinamiche produttive.

Il materiale prelevato viene caricato sul conveyor all'ingresso del sistema e diventa a tutti gli effetti un pezzo in lavorazione. Da questo momento in avanti, la movimentazione e l'avanzamento del pezzo sono interamente governati dalle logiche di controllo del flusso implementate nel sistema, che includono autorizzazioni locali alle lavorazioni tramite cartellini kanban, routing dinamico e meccanismi di prevenzione del deadlock. In particolare, la presenza di un ordine cliente non implica un'immissione

immediata del pezzo in lavorazione presso una workstation, ma esclusivamente l'attivazione del flusso di materiale verso il sistema.

Ne consegue che la gestione della domanda agisce come meccanismo di attivazione a monte, mentre la regolazione del numero di pezzi effettivamente lavorati e in circolazione è determinata dalle dinamiche interne del sistema, influenzate dalla capacità delle risorse, dalla struttura del layout a loop chiuso e dalla presenza di rilavorazioni e ricircoli. Questa impostazione consente di analizzare il comportamento del sistema produttivo concentrandosi sugli effetti delle logiche di controllo e dei vincoli strutturali, isolandoli da eventuali limitazioni di approvvigionamento o di gestione degli ordini.

L'architettura del modello appena descritto modellato in Arena è riportata in Appendice A.1 con le relative immagini esplicative.

5.2 Logiche di controllo

Il sistema produttivo descritto nella sezione 5.1 integra logiche di controllo finalizzate a regolare il flusso dei materiali, limitare il WIP complessivo, prevenire congestionamenti e deadlock e garantire un bilanciamento dinamico delle risorse. In particolare, sono implementati i seguenti:

- sistema pull,
- sistema kanban,
- routing dinamico,
- deadlock prevention.

L'implementazione di tali logiche nel modello Arena è descritta nell'Appendice A.2.

5.2.1 Sistema pull e kanban

L'avanzamento del materiale è gestito secondo principi pull: la produzione è attivata in risposta ad una domanda reale espressa dal mercato. L'arrivo di un ordine cliente triggera un segnale che si propaga a ritroso lungo la linea, dalla stazione più a valle fino alla prima. In risposta a tale segnale, il materiale fluisce verso valle "tirato" dal sistema. Questo tipo di avanzamento consente di aumentare la flessibilità e limitare il numero di unità contemporaneamente presenti nel sistema, riducendo il WIP e minimizzando gli sprechi legati a sovrapproduzione, attese, movimentazioni e accumuli.

Allo stesso tempo, però, risulta più sensibile alle fluttuazioni della domanda e richiede, per questo, un controllo accurato dei flussi interni.

Il kanban è il meccanismo operativo con cui la logica pull è implementata sebbene con qualche differenza rispetto ai sistemi chiusi classici: i cartellini non sono utilizzati per limitare globalmente il numero di parti presenti nel sistema, bensì come sistema di autorizzazione locale delle lavorazioni. Solo nelle stazioni critiche in termini di accumulo di unità produttive, la produzione è autorizzata mediante un kanban: solo in presenza di un cartellino disponibile un pezzo può accedere alla lavorazione e muoversi verso valle. Le stazioni con macchine identiche in parallelo condividono un'unica tipologia di cartellino. Il kanban, quindi, funge da sistema di autorizzazione della produzione e del movimento e meccanismo implicito di deadlock prevention. Ciascuna workstation ha un numero di cartellini disponibili definito in fase di progettazione e utilizzato come variabile di controllo della sperimentazione: si sceglie un numero unitario iniziale che viene incrementato progressivamente negli scenari simulativi. Nella Figura 5.4 si mostra come le tipologie di cartellini kanban sono assegnati alle workstation.

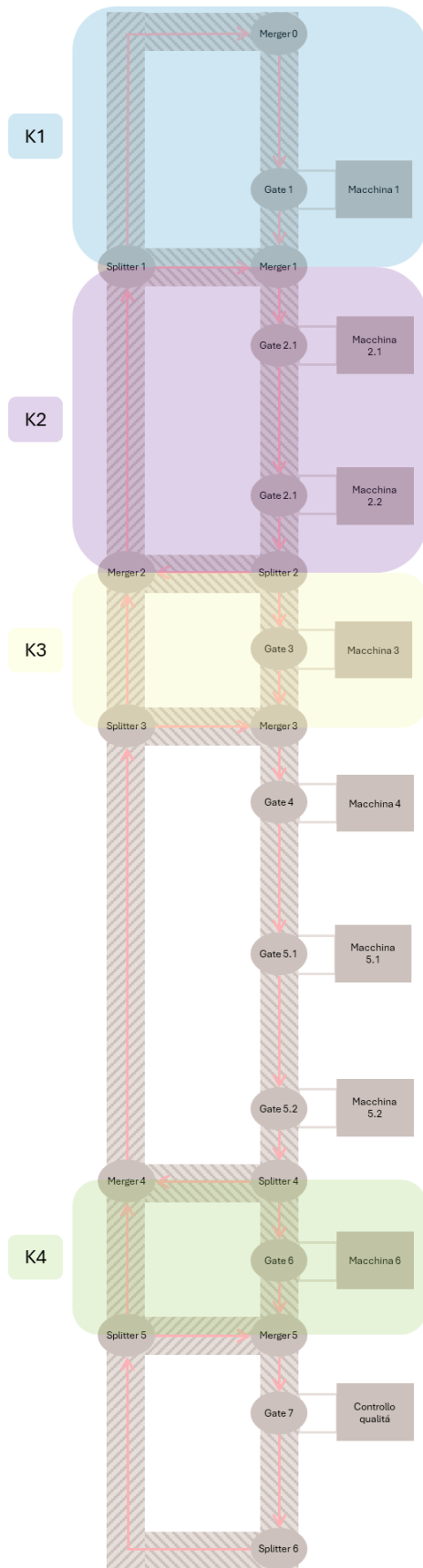


Figura 5.4: Workstation gestite da cartellini kanban

Per ciascun pezzo contenuto nell'ordine cliente è generato un segnale kanban e ciascuno opera separatamente dagli altri. Alla ricezione del segnale, un cartellino, se disponibile, è impegnato e resta in attesa di un pezzo a cui essere associato. Tale associazione è puramente logica poiché le due parti restano distinte durante la lavorazione. Questo consente di disaccoppiare facilmente i cartellini: al termine della lavorazione di un pezzo, infatti, il cartellino viene liberato e torna disponibile ad autorizzare quella del pezzo successivo.

Un numero elevato di cartellini per ogni tipologia influenza il throughput ma con il rischio di saturazione del conveyor, aumento dei ricircoli e tempi di attraversamento più instabili.

5.2.2 Routing dinamico e deadlock prevention

La gestione del routing è fondamentale in un sistema in cui la movimentazione dei pezzi avviene esclusivamente tramite un conveyor a loop chiuso e si ha la convergenza di pezzi in diversi stati di lavorazione nello stesso flusso.

Nei punti di accesso ad un loop, un segmento di conveyor o una macchina, è controllato che il numero di entità già presenti sia inferiore alla capacità di quel loop, conveyor o macchina e solo se tale condizione locale è verificata il pezzo fluisce, altrimenti resta in attesa di spazio disponibile sul tratto di conveyor o sulla risorsa.

In corrispondenza dei gate, è controllato che la risorsa sia disponibile; in caso contrario, il pezzo non resta in attesa ma viene instradato sul segmento di conveyor successivo e rimane in circolo fino a quando la macchina torna disponibile. Questo meccanismo evita la formazione di accumuli statici di materiale in corrispondenza delle stazioni senza introdurre blocchi fisici del conveyor. In presenza di una risorsa occupata, infatti, i pezzi non vengono trattenuti a monte né viene arrestato il flusso sul nastro, ma sono instradati sul loop di ricircolo e continuano a muoversi fino a quando la stazione torna disponibile. In questo modo l'attesa è realizzata sotto forma di ricircolo dinamico e non di fermo del trasporto, evitando effetti propagativi su tratti del conveyor non congestionati. La logica consente quindi di distribuire l'attesa lungo il sistema, limitare accumuli localizzati e mantenere un migliore bilanciamento operativo, con benefici sui tempi medi di attraversamento.

Ulteriore controllo che riduce il numero di entità nel sistema è implementato a livello di precedenze tra i flussi. I flussi convergono in corrispondenza dei gate e dei merger. Nel primo caso, i pezzi che hanno appena terminato una lavorazione si trovano a concorrere per uno spazio libero sul segmento a valle con i pezzi che giungono al gate dal conveyor a monte. La logica è quella di liberare la macchina il prima possibile in modo da poter continuare le lavorazioni e, perciò, le unità in uscita dalle risorse hanno la priorità. Nei merger, invece, confluiscono pezzi in ingresso e pezzi già presenti in un loop. In questo caso, la strategia è far fluire e processare le entità già presenti in un loop prima di farne entrare di nuove. In entrambi i casi, si riesce a regolare il flusso contribuendo alla prevenzione di deadlock.

Nel sistema sotto osservazione, il deadlock può verificarsi quando i pezzi si bloccano reciprocamente nell'attesa di accedere a stazioni o segmenti del conveyor attualmente occupati, impedendo l'avanzamento del flusso. Questa situazione è causata dalla presenza congiunta di spazio limitato sul conveyor, capacità unitaria delle risorse e assenza di buffer intermedi. La scelta di un sistema kanban costituisce già una forte limitazione all'insorgenza di congestionamenti perché limita il numero di entità in circolazione. Per evitare a priori la formazione di stati bloccati, però, si sceglie di implementare un controllo globale per la prevenzione del deadlock, anche a costo di rendere il sistema più rigido: in corrispondenza dei punti di accesso ad un loop, sia dal ramo principale che da quello di ritorno, è verificato che nel loop resti libero almeno uno spazio. La saturazione del loop, infatti, provocherebbe una situazione di deadlock irreversibile.

6 Progettazione degli scenari sperimentali

6.1 Assunzioni modellistiche

Il sistema è simulato in Arena Rockwell 16.2 su un computer con sistema operativo Windows e CPU Intel Core i5-3350P.

Si sceglie di simulare una produzione annuale a ciclo continuo, operativa 24 ore al giorno per 365 giorni all'anno.

Raccogliendo i dati relativi alla domanda settimanale soddisfatta per un periodo simulato di cinque anni, si osservano, come mostrato in Figura 6.1 oscillazioni contenute per cui si può assumere che il sistema vada immediatamente a regime. Di conseguenza a tale stabilità della domanda si possono trarre le medesime conclusioni per il throughput medio.

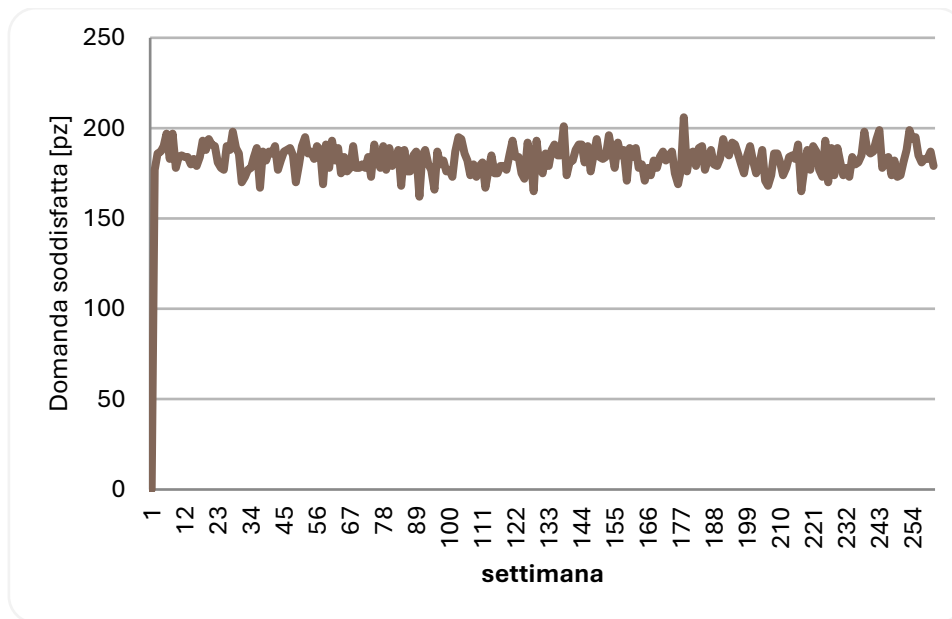


Figura 6.1: Domanda settimanale soddisfatta

Sebbene il periodo di transitorio potrebbe essere considerato trascurabile, si è scelto di adottare un warm-up di un anno. Questa decisione deriva dalla volontà di garantire che tutte le condizioni iniziali del sistema, inclusi eventuali accumuli di materiale, ricircoli e dinamiche transitorie, siano completamente smaltite prima di raccogliere le misure di performance. In questo modo si evita che possibili anomalie o fluttuazioni iniziali

possano influenzare i risultati della simulazione, assicurando così una maggiore affidabilità e rappresentatività dei dati raccolti.

Il numero di repliche è stato determinato con la seguente formula:

$$n = \left(\frac{t(\alpha, n_0 - 1) * \sigma}{\alpha * \mu} \right)^2$$

dove,

- t è il valore della distribuzione t-Student con n_0-1 gradi di libertà;
- α è il livello di significatività;
- μ è la media dei valori medi di throughput per ogni replica;
- σ è la deviazione standard dei valori medi di throughput per ogni replica;
- n_0 è il numero iniziale di replica.

È stata avviata una simulazione con un set iniziale di dieci repliche indipendenti per stimare l'intervallo di confidenza al 95% della media del throughput adottando la distribuzione t-Student con nove gradi di libertà. Tale simulazione ha evidenziato che la variabilità del throughput è estremamente bassa e il numero minimo di repliche per ottenere un livello di significatività al 5% è, arrotondato per eccesso, pari a 1 ed è adottato, quindi, per tutte le configurazioni sperimentali.

Il processo di arrivo degli ordini è poissoniano con tempi di arrivo distribuiti esponenzialmente con media pari al tempo ciclo teorico del sistema $T_c=20$ minuti. Tutti gli ordini ricevuti sono accettati e presi in carico ma processati solo una volta che le logiche e i controlli lo consentono. Ogni ordine contiene, per semplicità di analisi, un pezzo. La sequenza di evasione degli ordini è FIFO in modo che essi siano processati nell'ordine di arrivo e che i tempi di evasione sia omogenei. Questo approccio riduce il rischio che alcuni ordini rimangano in attesa per periodi prolungati rispetto ad altri.

A monte del sistema, il materiale è approvvigionato e immagazzinato in unità singole in un buffer di capacità illimitata. Il prelievo da tale magazzino materiali è, anche in questo caso, secondo la logica FIFO e si integra perfettamente con le strategie di evasione degli ordini, contribuendo a mantenere un flusso regolare e bilanciato lungo tutta la linea produttiva. La politica di approvvigionamento è tale da non generare indisponibilità e non gravare sulla produzione e sugli indicatori di performance. Il

materiale è caricato singolarmente sul conveyor all'ingresso del sistema e scaricato in corrispondenza di un gate e al completamento di tutte le lavorazioni. Ciascuna risorsa può lavorare un pezzo alla volta e al termine della lavorazione i pezzi sono caricati nuovamente sul conveyor.

I tempi di processo sono deterministici in modo da semplificare il modello e non influire ulteriormente sulla variabilità del tempo di attraversamento. Sempre per ragioni semplificative, non sono gestiti i fermi macchina per guasti, manutenzione e riparazione.

A seguito di un'analisi preliminare sono state riscontrate situazioni di deadlock riconducibili al fatto che il sistema produttivo analizzato è caratterizzato da assenza di buffer intermedi, capacità limitata dei segmenti di conveyor e presenza di ricircoli multipli. Al fine di garantire la continuità operativa del sistema e la confrontabilità degli scenari sperimentali, tutte le simulazioni presentate nel seguito sono condotte con meccanismi di deadlock prevention attivi. Tale scelta costituisce una condizione necessaria di fattibilità del modello, poiché consente di analizzare le prestazioni del sistema in regime stazionario evitando stati bloccanti che impedirebbero la raccolta degli indicatori di performance.

I cartellini kanban sono utilizzati come sistema di autorizzazione locale della lavorazione unicamente nelle workstation valutate critiche per l'accumulo di materiale. In particolare, per le workstation 4 e 5 non è previsto alcun controllo poiché in caso di indisponibilità di queste due risorse, i pezzi resterebbero nel loop stesso senza gravare in termini di accumulo sui segmenti a valle. In questo modo, quindi, si ottiene un sistema ibrido, differente da un kanban classico poiché solo alcune stazioni sono gestite mediante cartellini.

6.2 Scenario base

Lo scenario base rappresenta la configurazione di riferimento utilizzata per valutare gli effetti delle successive variazioni della sperimentazione. In questo scenario è impostato un livello minimo di autorizzazione alla produzione: per ciascuna workstation critica è previsto un singolo cartellino kanban (K1, K2, K3 e K4), in coerenza con quanto descritto nel Capitolo 5 e riportato nella Figura 5.4. Questa scelta consente di analizzare il comportamento del sistema in condizioni di controllo stringente. È tuttavia importante

osservare che, nonostante il numero ridotto di cartellini, il WIP totale del sistema non risulta rigidamente limitato dal meccanismo kanban. I cartellini, infatti, regolano esclusivamente l'accesso alle lavorazioni nelle workstation critiche, mentre i pezzi già presenti nel sistema possono continuare a circolare sul conveyor a loop chiuso, anche a causa dei ricircoli generati dalle macchine occupate e dalla probabilità di invio al controllo qualità. Di conseguenza, il livello di WIP complessivo è determinato non solo dalle autorizzazioni alla produzione, ma anche dalle dinamiche di movimentazione, dalla capacità dei loop e dai fenomeni di rilavorazione, rendendo questo scenario particolarmente utile per analizzare l'interazione tra controllo pull locale e accumuli globali nel sistema.

Tutti gli altri parametri rimangono invariati e sono quelli descritti nei capitoli precedenti. Lo scenario base costituisce pertanto il riferimento rispetto al quale valutare gli effetti di un aumento del numero di cartellini e, di conseguenza, della capacità produttiva del sistema. Inoltre, lo scenario base consente di comprendere in che misura la rigidità del sistema pull influenzi la stabilità del flusso, evidenziando eventuali fenomeni di sbilanciamento tra stazioni o di accumulo indesiderato.

6.3 Indicatori chiave di performance

Al fine di valutare in modo sistematico le prestazioni del sistema produttivo e confrontare in maniera coerente i diversi scenari sperimentali, sono stati definiti e monitorati una serie di indicatori di performance selezionati in accordo con la letteratura di riferimento e con le specifiche caratteristiche del sistema in esame.

In particolare, l'analisi si concentra sui seguenti KPI principali:

- **Throughput (TH):** misura la produttività del sistema ed è definito come il numero medio di pezzi completati per unità di tempo. Nel presente lavoro, il throughput è calcolato su base settimanale come media del numero di ordini evasi, in modo da attenuare eventuali fluttuazioni di breve periodo e ottenere una misura rappresentativa del regime stazionario del sistema.
- **Tempo medio di attraversamento:** rappresenta il tempo medio trascorso da un pezzo all'interno del sistema produttivo, dall'ingresso sul conveyor fino all'uscita come prodotto finito. Questo indicatore consente di valutare l'efficienza complessiva

del flusso e di quantificare l'impatto delle attese, dei ricircoli e delle movimentazioni sul conveyor rispetto ai tempi di lavorazione. Il tempo di attraversamento è ulteriormente analizzato distinguendo tra tempo a valore aggiunto, tempo a non valore aggiunto, tempo di attesa e tempo di trasferimento sul conveyor, così da evidenziare il peso relativo delle diverse componenti e comprendere quali dinamiche contribuiscono maggiormente all'allungamento dei tempi.

- **Work-In-Process (WIP) medio:** indica il numero medio di pezzi contemporaneamente presenti nel sistema, includendo sia le entità in lavorazione sulle risorse sia quelle in movimento sul conveyor a loop chiuso. Il WIP è un indicatore chiave per comprendere il livello di congestione interna e il grado di saturazione del sistema, soprattutto in presenza di ricircoli multipli e capacità di trasporto limitata.
- **Saturazione delle risorse:** esprime la percentuale di tempo in cui ciascuna macchina e il controllo qualità risultano occupati. Questo indicatore permette di individuare colli di bottiglia, squilibri tra risorse parallele e margini di capacità inutilizzata.
- **Saturazione dei loop del conveyor:** misura il grado di utilizzo dei diversi anelli di circolazione ed è fondamentale per analizzare i fenomeni di congestione, accumulo e potenziale insorgenza di deadlock in un layout a loop chiuso.

Tutti gli indicatori sono raccolti in condizioni di regime stazionario, successivamente al periodo di warm-up, e calcolati come valori medi sull'intero orizzonte temporale di simulazione. L'insieme dei KPI così definito costituisce la base comune per il confronto tra lo scenario base e gli scenari sperimentali, consentendo di valutare in modo quantitativo l'impatto del numero di cartellini kanban e delle logiche di controllo sul comportamento complessivo del sistema produttivo.

6.4 Configurazione degli scenari sperimentali

Gli scenari sperimentali sono progettati per analizzare l'effetto dell'aumento del numero di cartellini kanban sulle prestazioni del sistema produttivo, mantenendo invariati tutti gli altri parametri modellistici. L'obiettivo è osservare come differenti livelli di autorizzazione alla produzione influenzino il flusso dei materiali, il comportamento del conveyor e la stabilità complessiva del sistema.

A partire dallo scenario base, sono definiti una serie di scenari in cui il numero di cartellini assegnati alle workstation critiche viene incrementato in modo sistematico. La scelta di utilizzare come variabile sperimentale esclusivamente il numero di cartellini consente di isolare l'effetto delle politiche di controllo pull sul sistema, valutando il trade-off tra aumento della capacità produttiva e rischio di congestione dei loop, saturazione del conveyor e crescita del tempo di attraversamento.

In ogni scenario, la configurazione del sistema rimane identica per quanto riguarda layout, segmentazione del conveyor, tempi di processo, probabilità di invio al controllo qualità, logiche di routing dinamico e meccanismo di deadlock prevention. L'unica differenza tra uno scenario e l'altro è il livello di WIP autorizzato dal sistema kanban, che determina la quantità massima di entità contemporaneamente presenti nel flow shop.

Si riporta in Tabella 6.1 il numero di cartellini per ogni scenario.

Tabella 6.1: numero di cartellini per ogni scenario sperimentale

| | Scenario base | Scenario 1 | Scenario 2 |
|----|---------------|------------|------------|
| K1 | 1 | 1 | 10 |
| K2 | 1 | 2 | 20 |
| K3 | 1 | 1 | 10 |
| K4 | 1 | 1 | 10 |

Per ciascuna configurazione sono raccolti gli stessi indicatori di performance utilizzati nello scenario base: throughput, WIP medio, tempo di attraversamento, saturazione delle risorse e dei loop.

7 Risultati, discussione e conclusioni

7.1 Analisi delle performance dello scenario base

Prima di analizzare le prestazioni dello scenario base, è stato condotto un test preliminare volto a valutare il comportamento del sistema in assenza di meccanismi di deadlock prevention. In 10 repliche indipendenti su 10 si è verificata una condizione di deadlock, che ha portato all'arresto completo del flusso produttivo. Il deadlock è causato dalla saturazione simultanea dei loop del conveyor e dall'impossibilità per i pezzi di avanzare o liberare spazio, in presenza di risorse a capacità unitaria e assenza di buffer intermedi. Questo risultato conferma che, nel sistema analizzato, la prevenzione del deadlock non rappresenta un raffinamento del controllo, bensì una condizione necessaria per il funzionamento del sistema e per l'analisi delle sue prestazioni, come descritto nella sezione 6.1 del Capitolo 6.

L'analisi dei risultati ottenuti dallo scenario base evidenzia in modo chiaro il comportamento del sistema produttivo quando la produzione è autorizzata da un solo cartellino kanban per ciascuna stazione critica. La configurazione del controllo pull permette di limitare il WIP autorizzato, ma non elimina gli effetti dei riciccoli generati dalla natura stessa del layout a loop chiuso. Ne deriva un sistema che opera con un throughput moderato ma sottoposto a dinamiche interne molto variabili e spesso congestionate.

Tutte le risorse presentano tempi di processo deterministici e, considerando la presenza di macchine in parallelo nelle fasi critiche, il sistema risulterebbe idealmente bilanciato in assenza di fenomeni di variabilità. Infatti, trascurando le probabilità di invio al controllo qualità, le rilavorazioni, gli scarti e i riciccoli, i tempi ciclo di ciascuna risorsa e del sistema complessivo possono essere calcolati con le seguenti formule:

$$t_{c,i} = \frac{t_{p,i}}{m_i} * n_i \text{ [min]}$$

$$T_c = \max_i t_{c,i} \text{ [min]}$$

dove,

- $t_{c,i}$ è il tempo ciclo della macchina i ;

- m_i è il numero di macchine in parallelo nella workstation i ;
- n_i è il numero di lavorazioni effettuate nella workstation i .

Il tempo ciclo del sistema T_c è, quindi, pari a 20 minuti ma tale valore è solo teorico a causa della presenza di rilavorazioni, scarti e ricircoli multipli. Il throughput, anch'esso teorico, è calcolato come:

$$TH = \frac{60}{T_c} \text{ [pz/h]}$$

e risulta pari a 3 pz/h. Il valore atteso nel sistema in analisi in cui il vincolo primario risiede nella presenza di una probabilità di invio al controllo qualità, ricircoli multipli e risorse limitate è, però, più basso.

Il throughput reale medio restituito dalla simulazione si attesta a poco più di un pezzo all'ora, un valore coerente con quello atteso. Inoltre, come mostrato nella Figura 7.1, la variabilità del throughput risulta contenuta: l'andamento settimanale del throughput medio mostra, infatti una produzione piuttosto stabile, con fluttuazioni minime tra un periodo e l'altro.

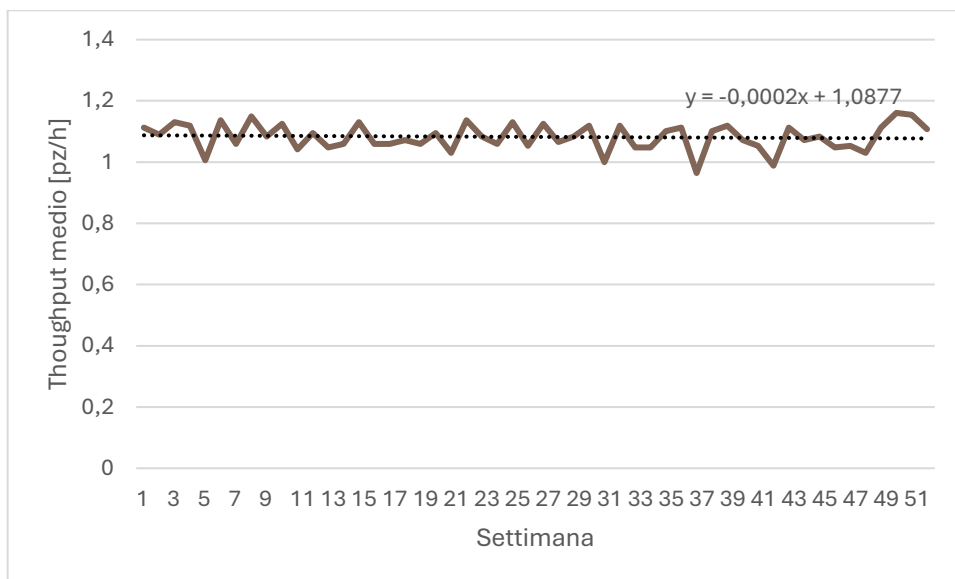


Figura 7.1: Throughput medio settimanale

Il tempo medio di attraversamento risulta, invece, elevato (circa 27 ore in media) e, come mostrato in Figura 7.2, è caratterizzato da una variabilità molto ampia: alcuni pezzi completano il ciclo in tempi relativamente brevi, mentre altri rimangono nel sistema per intervalli anche di un ordine di grandezza superiore. Questa variabilità non è attribuibile

tanto ai processi di lavorazione, che presentano tempi deterministici e risorse capaci di gestire la domanda, quanto piuttosto ai continui ricircoli e alle attese dovute a loop saturi, priorità locali e meccanismi di deadlock prevention, precedentemente descritti nella sezione 5.2 del Capitolo 5, che impediscono ai pezzi di avanzare quando un anello risulta vicino alla capacità massima.

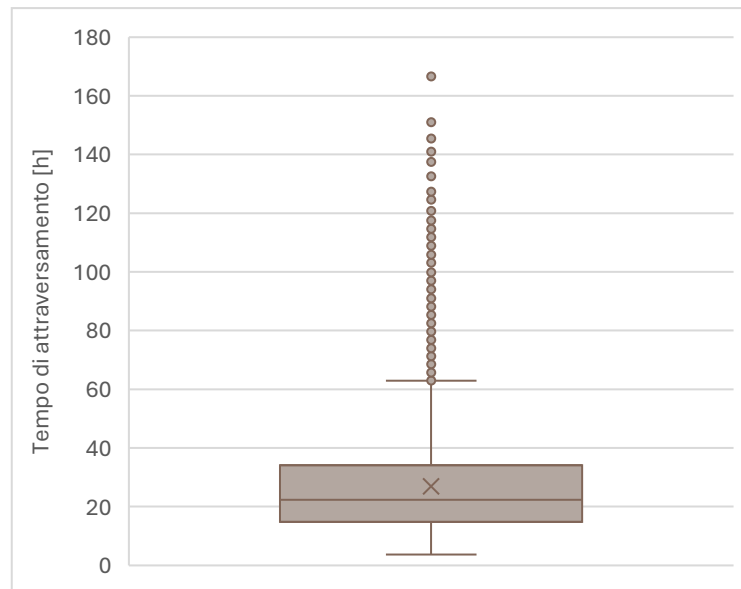


Figura 7.2: Variabilità del tempo di attraversamento

L'osservazione dei tempi di attività a valore aggiunto e dei tempi di movimentazione conferma questa dinamica: la componente di lavorazione rappresenta una frazione minima del tempo totale trascorso nel sistema, mentre la maggior parte del tempo è assorbita da attese e trasferimenti sul conveyor. Nella Figura 7.3: Componenti del tempo medio di processo in scala logaritmica si mostrano, su scala logaritmica, le diverse componenti del tempo medio di processo e, in particolare, le frazioni di tempo a valore aggiunto, a non valore aggiunto, il tempo di attesa e di trasferimento.

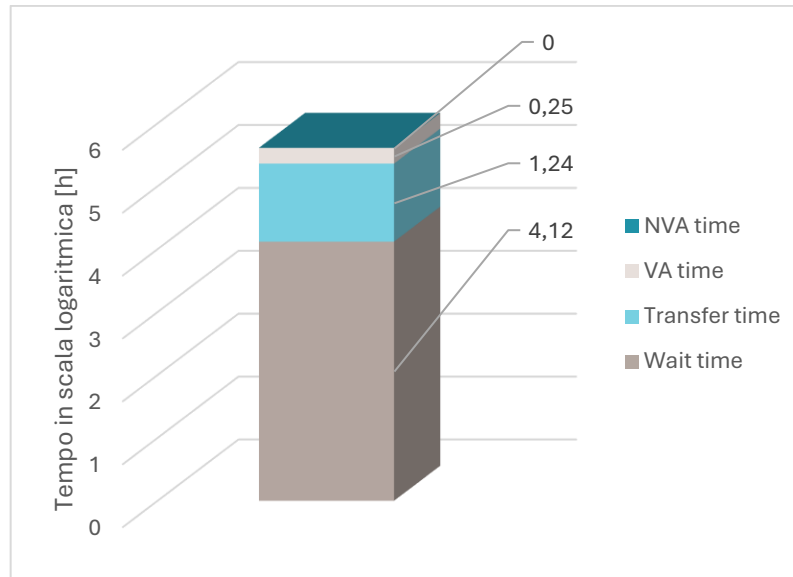


Figura 7.3: Componenti del tempo medio di processo in scala logaritmica

Il conveyor, concepito per evitare l'accumulo locale davanti alle risorse, è il principale buffer del sistema, e la sua saturazione determina rallentamenti diffusi. I tratti di sistema più a monte risultano particolarmente carichi, con livelli medi di utilizzo significativamente superiori rispetto ai segmenti più a valle. Ciò suggerisce che i ricircoli generati dalle rilavorazioni e dalle macchine occupate tendono ad accumularsi in queste zone, amplificando l'instabilità del flusso. La mappa del calore nella Figura 7.4 mostra i tratti più affollati del conveyor che viene riportato in Figura 7.5.

| a→ ↓da | Splitter 2 | Splitter 4 | Splitter 6 |
|-----------|------------|------------|------------|
| Merger 0 | 98,37% | 53,85% | 42,85% |
| Merger 1 | 99,98% | 44,41% | 34,18% |
| Merger 3 | | 6,41% | 6,69% |
| Merger 5 | | | 5,05% |

Figura 7.4: Saturazione del conveyor



Figura 7.5: Schema semplificato del conveyor

L'analisi della saturazione delle risorse permette di individuare con chiarezza il collo di bottiglia del sistema. La prima workstation risulta completamente saturata e rappresenta la principale limitazione al throughput complessivo. Le stazioni successive

presentano invece livelli medi di utilizzo inferiori e più equilibrati. Nella seconda fase di lavorazione, caratterizzata da due macchine parallele, emerge una distribuzione non omogenea del carico: una macchina risulta molto più utilizzata dell'altra. In particolare, l'accesso alle macchine avviene tramite gate sequenziali lungo il conveyor e il routing è basato su condizioni locali, senza meccanismi espliciti di bilanciamento del carico. In presenza di un solo cartellino kanban, il sistema autorizza una sola lavorazione alla volta nella workstation, impedendo l'utilizzo simultaneo delle due macchine. Inoltre, in generale i livelli di utilizzo sono poco variabili. La saturazione media di ciascuna macchina è mostrata in Figura 7.6.

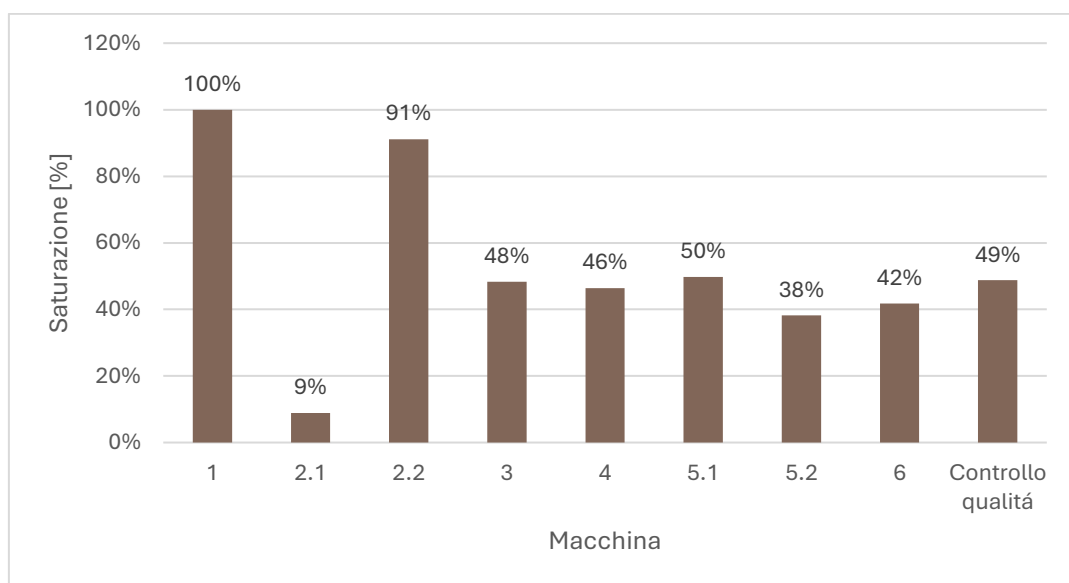


Figura 7.6: Saturazione media delle macchine

Il controllo qualità contribuisce all'aumento della variabilità del sistema. Una parte dei pezzi è rilavorata, aumentando il numero di transiti attraverso i loop e incrementando il WIP effettivo, che non è limitato dai kanban. Questo spiega perché, nonostante la presenza di un solo cartellino per stazione, il numero medio di entità in movimento nel sistema, come mostrato in Figura 7.7 è di circa 36 pezzi con picchi di 43 unità: i kanban controllano l'ingresso alla lavorazione, ma non impediscono che i pezzi già presenti continuino a circolare attraverso il conveyor.

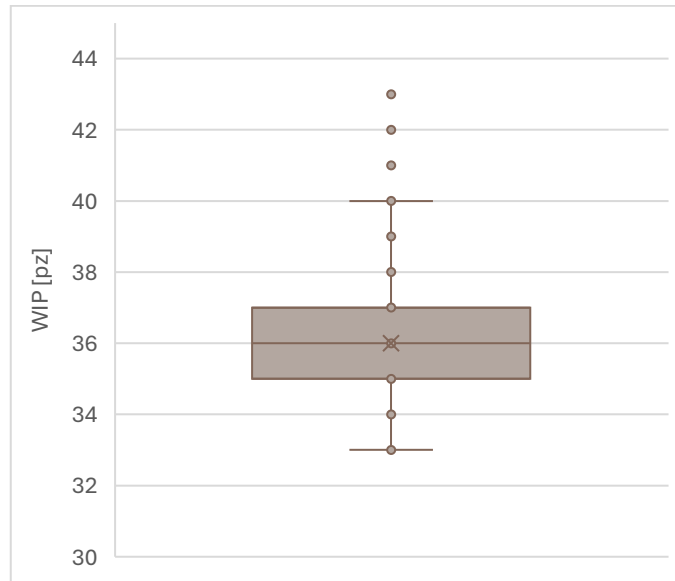


Figura 7.7: Variabilità del WIP

Nel complesso, i risultati dello scenario base mostrano un sistema operante in condizioni di forte sovraccarico interno. Le logiche di deadlock prevention da una parte garantiscono la stabilità del flusso ed evitano condizioni bloccanti e dall'altra determinano tempi di attraversamento alti e un'elevata congestione nei loop a causa del numero di entità complessive. Il sistema risulta dunque dominato dai meccanismi di movimentazione e attesa, più che dai processi di lavorazione. Questo comportamento conferma la necessità di esplorare scenari caratterizzati da un maggior numero di cartellini kanban, che possano alleggerire la pressione sui loop, e restituire un equilibrio più favorevole tra produttività, saturazione del conveyor e stabilità del sistema.

7.2 Confronto tra scenari sperimentali

I risultati relativi a throughput, tempo medio di attraversamento e WIP negli scenari sperimentali sono riportati nella Figura 7.8.

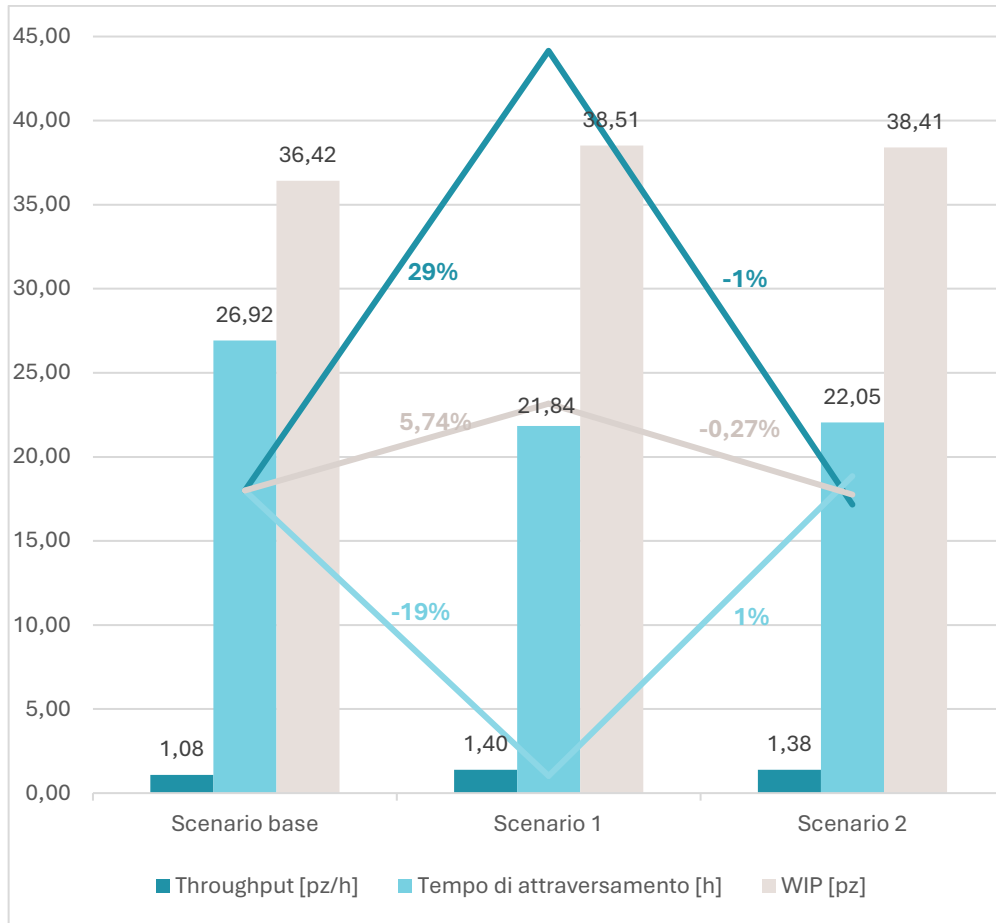


Figura 7.8: Throughput, tempo di attraversamento e WIP a confronto negli scenari sperimentali

Nello scenario 1, la presenza di due cartellini per la stazione con risorse in parallelo si osserva un aumento del throughput quasi del 30%. Tale aumento è statisticamente significativo poiché, confrontando gli intervalli di confidenza del throughput medio, si è ottenuto quanto segue.

Siano TH_1 e TH_2 i valori medi del throughput rispettivamente nello Scenario base e nello Scenario 1. La media e la semi-ampiezza dell'intervallo di confidenza della differenza ΔTH sono calcolati come:

$$\bar{x}_\Delta = \bar{x}_2 - \bar{x}_1$$

$$h_\Delta = \sqrt{h_1^2 + h_2^2}$$

I risultati ottenuti, riportati in Tabella 7.1, indicano che l'intervallo di confidenza della variabile ΔTH non include lo zero. Pertanto, la differenza ΔTH è statisticamente significativa.

Tabella 7.1: Intervalli di confidenza del throughput medio in scenario base e scenario 2

| | Media (\bar{x}_i) | Semi-ampiezza intervallo di confidenza (h_i) | Intervallo di confidenza ($\bar{x}_i \pm h_i$) |
|-------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| TH₁ | 1,08 | 0,01 | [1,07; 1,09] |
| TH₂ | 1,39731 | 0,0114 | [1,3859; 1,4087] |
| ΔTH | 0,31720 | 0,0152 | [0,3021; 0,3325] |

Confrontando gli scenari 1 e 2, invece, si può osservare che il throughput rimane sostanzialmente invariato al crescere del numero di kanban. Questo conferma che il sistema è dominato da vincoli strutturali, non gestionali: il vero limite non è la disponibilità di autorizzazioni, ma la capacità delle risorse critiche, la saturazione dei loop del conveyor e le dinamiche dei ricircoli generate dal layout a loop chiuso. Un aspetto particolarmente rilevante emerso dall'analisi è che nello Scenario 2 il throughput diminuisce leggermente rispetto allo Scenario 1, nonostante la disponibilità di un numero di cartellini nettamente superiore. Questo comportamento apparentemente controintuitivo trova spiegazione nella natura stessa del layout e nelle logiche di controllo implementate. Come mostrato in analisi successive l'aumento eccessivo dei cartellini porta infatti a un sovraccarico del conveyor, soprattutto nei tratti più a monte, dove si concentrano i ricircoli generati dalle rilavorazioni e dalle risorse occupate. La maggiore quantità di pezzi in circolazione finisce per creare congestione nei loop e rallentamenti diffusi nei segmenti critici, aggravati dai meccanismi di deadlock prevention che impediscono l'accesso a un loop quando rimane disponibile una sola cella. Di conseguenza, il sistema sperimenta un incremento delle attese sui nodi di routing, un aumento dei cicli di ritorno e una crescita del tempo di attraversamento medio, tutti fattori che limitano la produttività complessiva.

L'analisi del tempo medio di attraversamento evidenzia una dinamica coerente con quanto osservato per il throughput e conferma il ruolo centrale dei ricircoli e della saturazione dei loop nel determinare le prestazioni complessive del sistema. L'incremento moderato del numero di cartellini nello Scenario 1 produce un miglioramento significativo di circa il 20% mostrando una riduzione sensibile delle attese complessive e

una maggiore fluidità del flusso. Lo Scenario 2, al contrario, non genera ulteriori benefici. Infine, la variabilità di tale KPI resta elevata e critica.

Il Work-In-Process medio del sistema presenta variazioni trascurabili passando dallo scenario base a quelli con un numero maggiore di cartellini. I valori oscillano attorno allo stesso livello, segno che la quantità di pezzi in circolazione è determinata più dalle dinamiche dei ricircoli e dal funzionamento del conveyor che dal numero di autorizzazioni disponibili. In particolare, l'assenza di buffer intermedi e la presenza di loop a capacità limitata fanno sì che le entità già presenti nel sistema continuino a circolare indipendentemente dal livello di kanban. Di conseguenza, anche quando il numero di cartellini viene aumentato, il WIP effettivamente percepito dal sistema non varia in modo significativo: i pezzi aggiuntivi immessi si sommano alle entità già in circolo, ristagnando nei segmenti più saturi del conveyor.

Come si mostra nella Figura 7.9, la saturazione delle macchine conferma la presenza di uno sbilanciamento strutturale del sistema, che rimane invariato al variare dei cartellini.

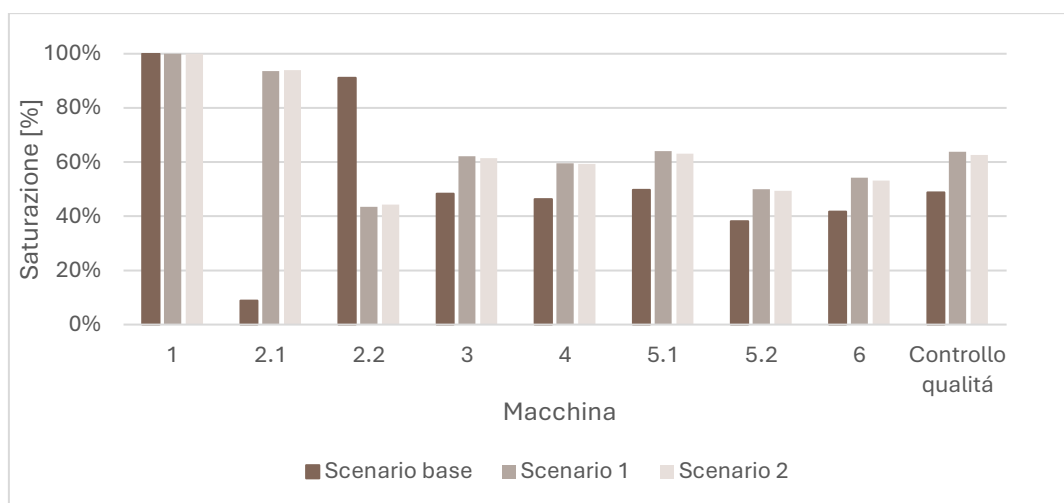


Figura 7.9: Saturazione media delle macchine a confronto negli scenari sperimentali

La prima workstation continua a operare al massimo della capacità, mentre le stazioni successive mostrano livelli di utilizzo inferiori e simili tra loro in tutti gli scenari. Nella workstation con una coppia di macchine parallele, l'aumento dei cartellini comporta un miglioramento parziale della distribuzione del carico: lo sbilanciamento tra le macchine resta presente ma tende a ridursi. Questo risultato indica che il sistema beneficia

della disponibilità aggiuntiva di WIP nella fase in cui sono presenti macchine gemelle e questo consente di sfruttare in misura più efficace la capacità delle risorse senza compromettere la stabilità del flusso. Tale maggiore equilibrio contribuisce a ridurre i ricircoli inutili e a limitare l'occupazione superflua del conveyor, con un effetto complessivamente favorevole sulla dinamica del sistema e, di conseguenza, sulla produttività. Da questi risultati si evince che, in ogni caso, il numero di cartellini per ciascuna stazione di lavoro deve essere proporzionale alle risorse disponibili nella stessa in modo tale da sfruttare al massimo la capacità produttiva, nei limiti di WIP consentiti. Nello Scenario 2 tale proporzionalità è rispettata ma il numero di kanban è superiore di un ordine di grandezza.

Analogamente, i loop del conveyor mostrano livelli di congestione molto simili tra gli scenari fatta eccezione per il tratto in corrispondenza della workstation con risorse in parallelo dove si ha una significativa riduzione della saturazione. Dal punto di vista operativo, questa variazione suggerisce che il sistema, pur con un leggero aumento del WIP autorizzato, riesce a svuotare più velocemente i tratti critici eliminando uno dei principali colli di bottiglia del layout. Per il resto le sezioni più a monte del sistema continuano a essere soggette a saturazione, con elevati tempi di attesa e numerosi ricircoli. L'aumento del numero di cartellini non riduce tali fenomeni, ma in alcuni casi li amplifica leggermente, pur senza effetti significativi sull'output finale. La Figura 7.10 mostra che il livello di utilizzo di ciascun loop non varia in maniera consistente se non nel caso della seconda workstation.

| da | a | Scenario base | Scenario 1 | Scenario 2 |
|----------|------------|---------------|------------|------------|
| Merger 0 | Splitter 2 | 98,37% | 98,93% | 98,97% |
| Merger 1 | Splitter 2 | 99,98% | 81,65% | 81,60% |
| Merger 0 | Splitter 4 | 53,85% | 56,07% | 56,00% |
| Merger 1 | Splitter 4 | 44,41% | 39,51% | 39,39% |
| Merger 3 | Splitter 4 | 6,41% | 8,99% | 8,84% |
| Merger 0 | Splitter 6 | 42,85% | 45,31% | 45,19% |
| Merger 1 | Splitter 6 | 34,18% | 31,52% | 31,35% |
| Merger 3 | Splitter 6 | 6,69% | 9,54% | 9,33% |
| Merger 5 | Splitter 6 | 5,05% | 7,76% | 7,50% |

Figura 7.10: Saturazione dei loop a confronto negli scenari sperimentali

In definitiva, i risultati mostrano che l'incremento del numero di cartellini kanban disponibili non comporta variazioni sostanziali nelle prestazioni complessive del sistema

produttivo. Nonostante l'aspettativa che una maggiore disponibilità di autorizzazioni alla lavorazione porti ad un aumento del throughput e ad una riduzione delle attese, l'analisi numerica conferma che il comportamento del sistema rimane sostanzialmente stabile in tutti gli scenari considerati. La ragione principale risiede nella natura dei vincoli strutturali che caratterizzano il layout produttivo analizzato. In particolare, il sistema è fortemente influenzato dalla limitata capacità delle risorse critiche, dalla saturazione dei loop del conveyor e dalle dinamiche dei ricircoli che si generano a causa dell'assenza di buffer intermedi e della struttura a loop chiuso. Anche aumentando il numero di autorizzazioni alla produzione, il vero collo di bottiglia resta la capacità fisica della rete di trasporto e delle risorse critiche, non la disponibilità di permessi alla lavorazione. Quando il sistema raggiunge il suo limite strutturale, un'ulteriore immissione di pezzi non solo non apporta benefici, ma può addirittura causare congestione nei tratti più critici del conveyor, aumentando i tempi di attesa e il rischio di deadlock. Di conseguenza, throughput e tempo medio di attraversamento restano pressoché invariati, poiché la saturazione delle risorse impedisce qualsiasi ulteriore incremento della produttività o riduzione delle attese.

In sintesi, l'analisi numerica dimostra che, in sistemi dominati da vincoli fisici e da forti fenomeni di ricircolo, la leva gestionale rappresentata dal kanban ha un impatto limitato: una volta raggiunto il livello ottimale di WIP consentito dal layout, ulteriori autorizzazioni non migliorano le performance e possono addirittura introdurre inefficienze.

Poiché gli indicatori principali risultano sostanzialmente invariati al variare del numero di cartellini, l'analisi di altri scenari non fornirebbero alcun valore aggiunto significativo all'analisi.

In Appendice B si trova un riepilogo dei principali indicatori osservati negli scenari sperimentali.

7.3 Conclusioni

Questo lavoro ha analizzato il comportamento dinamico di un sistema produttivo caratterizzato da ricircoli multipli, assenza di buffer intermedi, movimentazione interamente affidata a un conveyor a loop chiuso e integrazione simultanea di differenti

logiche di controllo, in particolare sistema pull, kanban, routing dinamico e deadlock prevention. Attraverso la simulazione ad eventi discreti, è stato possibile investigare come tali componenti interagiscano in presenza di vincoli strutturali significativi e come l'aumento dell'autorizzazione alla produzione incida sulle prestazioni globali del sistema.

L'obiettivo principale era valutare se l'incremento del numero di cartellini kanban, tradizionalmente considerato un meccanismo efficace per aumentare la produttività e ridurre le attese nei sistemi pull, potesse costituire una leva gestionale valida anche in un sistema caratterizzato da ricircoli multipli e da limitata capacità di trasporto. In letteratura, infatti, numerosi studi hanno dimostrato l'efficacia del kanban nel bilanciare le fasi produttive, contenere il WIP e ridurre la variabilità operativa; tuttavia, tali evidenze provengono prevalentemente da contesti puramente pull, lineari o con buffer definiti, nei quali i flussi sono più prevedibili e la presenza di ricircoli è marginale o assente.

I risultati ottenuti in questo studio, invece, mostrano un quadro differente: l'incremento del numero di cartellini kanban produce effetti limitati sulle prestazioni complessive del sistema, in particolare su WIP e throughput. Tale comportamento non indica una inefficacia intrinseca del kanban, ma è riconducibile alla natura strutturalmente ibrida del sistema analizzato. Nel modello sviluppato, infatti, il kanban agisce come meccanismo di autorizzazione locale all'accesso alle lavorazioni in alcune workstation critiche, ma non governa il numero complessivo di entità presenti nel sistema. La presenza di un conveyor a loop chiuso, l'assenza di buffer intermedi e i ricircoli generati sia dalle risorse occupate sia dalle rilavorazioni al controllo qualità determinano un accumulo di WIP che non è direttamente limitato dal numero di cartellini disponibili. Di conseguenza, una volta raggiunto un certo livello di saturazione strutturale, il comportamento del sistema risulta dominato dai vincoli fisici del layout e dalla capacità della rete di trasporto piuttosto che dalle logiche di autorizzazione alla produzione.

Infatti, emergono dinamiche tipiche dei sistemi fortemente vincolati dal layout: il throughput si mantiene su valori moderati e piuttosto stabili, mentre i tempi di attraversamento risultano elevati e altamente variabili. La componente dominante del tempo complessivo non è imputabile ai processi di lavorazione, bensì alle attese e alla movimentazione sul conveyor, spesso saturo nei tratti più a monte. Ciò conferma che, in sistemi caratterizzati da cicli di ritorno obbligati e capacità di trasporto limitata, la

dinamica del flusso risulta sensibilmente influenzata da fenomeni di congestione e dalla presenza di ricircoli ripetuti.

L'aumento del numero di cartellini negli scenari analizzati non produce cambiamenti significativi nel comportamento del sistema. Si osservano benefici localizzati, come un miglior bilanciamento del carico e un incremento parziale del throughput nelle aree dotate di risorse parallele, con effetti positivi circoscritti. Tuttavia, questi miglioramenti non riescono a estendersi all'intero sistema, che continua a essere fortemente influenzato dai vincoli strutturali imposti dal layout. Anche la riduzione dei tempi di attraversamento risulta solo moderata e non sufficiente a rendere il flusso produttivo sostanzialmente più fluido.

Inoltre, emergono i limiti intrinseci del sistema: invece di favorire una crescita delle prestazioni, si assiste spesso a fenomeni di peggioramento, come il sovraccarico del conveyor, l'aumento dei ricircoli, la congestione nei loop e una maggiore frequenza di situazioni vicine alla saturazione, complicate anche dai meccanismi di prevenzione del deadlock. In sostanza, una maggiore libertà gestionale non si traduce automaticamente in una reale capacità del sistema di gestire un WIP più elevato, rivelando così un evidente disallineamento tra le autorizzazioni alla produzione e le effettive capacità fisiche della rete di trasporto.

Nel complesso, i risultati mettono in evidenza come il sistema sia dominato da vincoli strutturali più che dalle logiche di controllo implementate. La saturazione della prima workstation, la capacità limitata dei segmenti di conveyor e la presenza di nodi critici in corrispondenza dei merge e degli splitter costituiscono colli di bottiglia che non possono essere eliminati semplicemente aumentando il numero di cartellini disponibili. L'interazione tra ricircoli multipli e probabilità di invio al controllo qualità amplifica ulteriormente tali fenomeni, contribuendo a generare un flusso caratterizzato da instabilità locale e da una variabilità intrinseca difficilmente mitigabile tramite sole politiche pull.

Questo studio mostra dunque come, in presenza di sistemi complessi con elevate interdipendenze e vincoli di trasporto stringenti, le politiche pull si rivelano utili per limitare l'accumulo locale di WIP, ma non incidono in modo significativo sulle cause profonde delle inefficienze, che risiedono nel layout stesso e nelle dinamiche di congestione del conveyor.

In conclusione, la ricerca mostra che, in sistemi complessi a loop chiuso, l'incremento del numero di cartellini kanban non costituisce una leva gestionale sufficiente per migliorare la produttività, ridurre i tempi di attraversamento o mitigare le instabilità operative. Il comportamento osservato è fortemente condizionato da vincoli non gestionali e da dinamiche interne difficilmente controllabili tramite sole politiche di autorizzazione alla produzione..

7.4 Limiti del lavoro

Il presente lavoro presenta alcuni limiti intrinseci, sia di natura modellistica sia di natura metodologica.

Un primo limite riguarda la semplificazione dei tempi di processo, modellati come deterministici e privi di variabilità. Tale scelta, se da un lato consente di isolare gli effetti delle logiche di controllo e della struttura del layout, dall'altro riduce il realismo del modello, soprattutto considerando che nella pratica industriale la variabilità operativa, dovuta a fattori umani, tecnologici o ambientali, rappresenta uno degli elementi più critici nel generare congestioni e instabilità dei flussi. L'assenza di variabilità nei tempi può, quindi, aver attenuato alcune dinamiche stocastiche tipiche dei sistemi reali, influenzando la magnitudine di fenomeni quali le attese e il numero di ricircoli.

Un ulteriore limite è legato alla gestione dei guasti e della manutenzione. Nel modello le risorse sono considerate sempre disponibili e non soggette a fermi macchina. Questa assunzione semplificativa, utile per mantenere il focus sugli aspetti di controllo del flusso, non rappresenta tuttavia la complessità operativa dei sistemi produttivi reali, nei quali i guasti influenzano in modo sostanziale il throughput, la saturazione delle risorse e la propagazione delle congestioni. L'inclusione di modelli di affidabilità, manutenzione preventiva o correttiva avrebbe permesso di analizzare scenari più vicini alle reali condizioni operative.

Infine, un limite importante riguarda la focalizzazione esclusiva sul numero di cartellini kanban come variabile sperimentale. Sebbene questa scelta sia coerente con l'obiettivo principale della ricerca, essa esclude altre leve gestionali che nella realtà possono influire significativamente sulle prestazioni del sistema, quali: politiche di rilascio degli ordini, algoritmi avanzati di dispatching, modifiche della struttura del

layout, variazioni nella capacità dei segmenti di trasporto o introduzione di buffer localizzati.

7.5 Proposte per sviluppi futuri

Un filone di approfondimento potrebbe riguardare l'integrazione di politiche di controllo ibride, in cui i meccanismi pull siano affiancati da logiche push mirate, oppure da strategie di controllo globale del WIP come CONWIP. Il confronto tra diversi paradigmi di gestione del flusso permetterebbe di comprendere in quali condizioni ciascuna politica risulti più efficace e quali siano i compromessi tra stabilità, reattività e produttività.

Un ulteriore sviluppo potrebbe concentrarsi sull'implementazione di logiche decisionali intelligenti, quali algoritmi di ottimizzazione, strategie adattive oppure approcci basati sull'intelligenza artificiale. In un ambiente caratterizzato da ricircoli multipli e interazioni non lineari, un controllo adattivo potrebbe individuare in tempo reale le condizioni critiche del sistema e indirizzare i flussi prima che si formino congestioni. Questo aprirebbe la strada a forme di gestione più reattive e meno vincolate da regole statiche.

Bibliografia

Berkley, B. J., & Kiran, A. S. (1991). A simulation study of sequencing rules in a kanban-controlled flow shop. *Decision Sciences*, 22(3), 559–582.

Bozer, Y. A., & Hsieh, Y. J. (2005). Throughput performance analysis and machine layout for discrete-space closed-loop conveyors. *IIE Transactions*, 37(1), 77–89.

Davis, R., & King, J. (1975). An overview of production systems. *Technical Report STAN-CS-75-524 (AIM-271)*, Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University.

Graves, R. J., Konopka, J. M., & Milne, R. J. (1995). Literature review of material flow control mechanisms. *Production Planning & Control*, 6(5), 395–403.

Gupta, S., & Jain, S. K. (2013). A literature review of lean manufacturing. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 8(4), 241–249.

Hester, P., Ezell, B., Collins, A., Horst, J., & Lawsure, K. (2017). A method for key performance indicator assessment in manufacturing organizations. *International Journal of Operations Research*, 14(4), 157.

Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2011). *Factory physics: Foundations of manufacturing management* (3rd ed.). McGraw-Hill/Irwin.

Muth, E. J. (1972). Analysis of closed-loop conveyor systems. *AIIE Transactions*, 4(2), 134–143.

Palange, A., & Dhatrak, P. (2021). Lean manufacturing a vital tool to enhance productivity in manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 46, 729–736.

Pažek, K. (Ed.). (2021). *Lean Manufacturing*. IntechOpen.

Soukhal, A., Oulamara, A., & Martineau, P. (2005). Complexity of flow shop scheduling problems with transportation constraints. *European Journal of Operational Research*, 161(1), 32–41.

Sugimori, Y., Kusunoki, K., Cho, F., & Uchikawa, S. (1977). Toyota production system and kanban system: Materialization of just-in-time and respect-for-human system. *International Journal of Production Research*, 15(6), 553–564.

Thürer, M., Stevenson, M., & Protzman, C. W. (2015). COBACABANA (Control of Balance by Card Based Navigation): An alternative to kanban in the pure flow shop? *International Journal of Production Economics*, 166, 143–151.

Viswanadham, N., Narahari, Y., & Johnson, T. L. (1990). Deadlock prevention and deadlock avoidance in flexible manufacturing systems using Petri net models. *IEEE Transactions on Robotics & Automation Magazine*, 6(6), 713–723.

Zhang, M., Batta, R., & Nagi, R. (2009). Modeling of workflow congestion and optimization of flow routing in a manufacturing/warehouse facility. *Management Science*, 55(2), 267–280.

Zhu, L., Johnsson, C., Mevik, J., Varisco, M., & Schiraldi, M. (2017). Key performance indicators for manufacturing operations management in the process industry. In *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 969–973). IEEE.

Appendice

A. Modello Arena

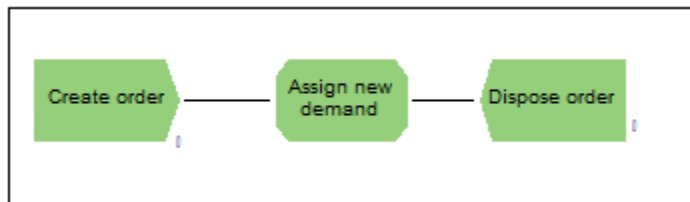
A.1 Architettura generale del modello

Il modello implementato in Arena riproduce quanto più fedelmente il layout del sistema produttivo e la dinamica dei flussi.

L'architettura è divisa in sottoinsiemi funzionali interconnessi che rappresentano l'arrivo degli ordini, il sistema di approvvigionamento, la movimentazione sul conveyor a loop chiuso, la trasformazione dei pezzi attraverso i processi di lavorazione nelle workstation, l'invio al controllo qualità e la registrazione degli output. I meccanismi di pull, kanban, routing dinamico e deadlock prevention sono descritti nel paragrafo A.2.

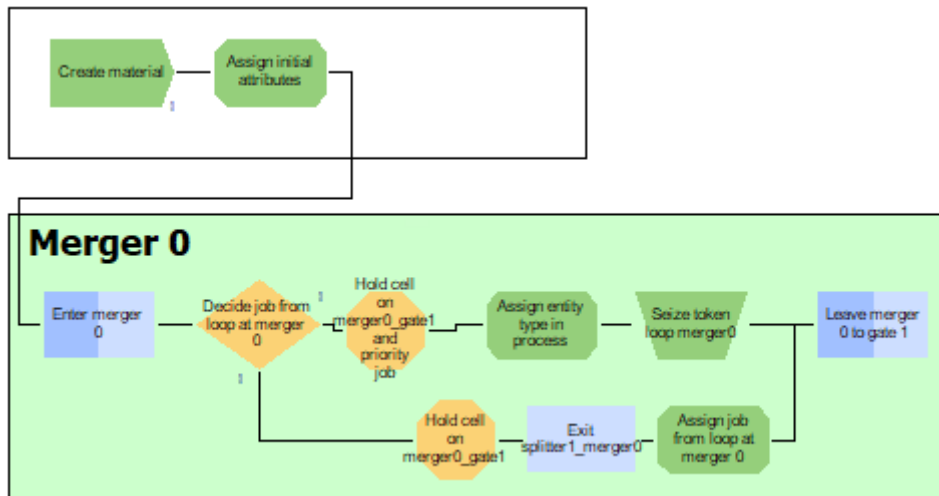
Le immagini riportate in seguito non sono esaustive di tutto il modello implementato ma solo a titolo di esempio.

Gestione degli ordini cliente



Gli ordini sono modellati come entità create con un processo poissoniano. Ciascuna di esse incrementa una variabile globale del sistema che rappresenta la domanda da soddisfare e attiva la produzione in logica pull. A questo punto, quindi, le entità ordine sono rimosse dal sistema poiché l'intento non è quello di monitorare lo stato dell'ordine ma generare una domanda che "tiri" la produzione.

Sistema di approvvigionamento



Le entità materiale sono create secondo la strategia di approvvigionamento scelta e alimentano il sistema produttivo. Esse sono stoccate temporaneamente in un buffer logico illimitato per essere immediatamente disponibili in ordine FIFO quando richieste. Non è oggetto di questa tesi, infatti, gestire in maniera più strutturata e complessa l'immagazzinamento.

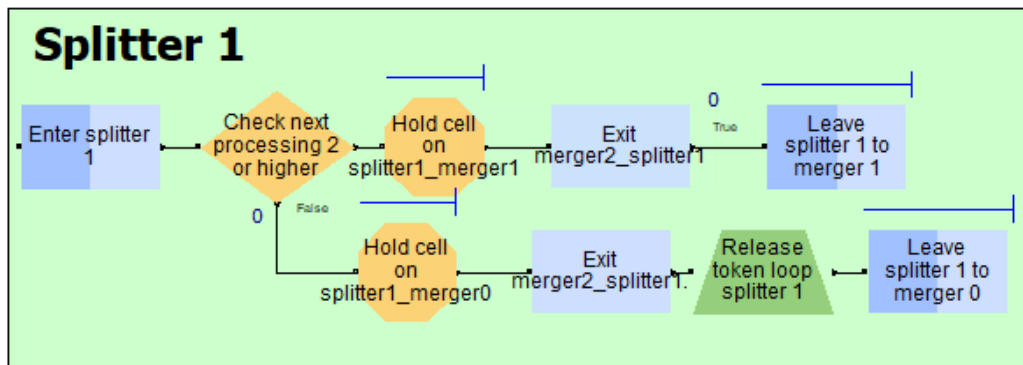
Movimentazione del flusso

| Modello X | | | | | | | |
|-----------|---------------------|-----------------------------|--------------|----------|------------|-----------|-----------|
| | Name | Segment Name | Type | Velocity | Units | Cell Size | Max Cells |
| 1 | gate1_merger1 | gate1_merger1.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 2 |
| 2 | gate2.1_gate2.2 | gate2.1_gate2.2.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 4 |
| 3 | gate2.2_splitter2 | gate2.2_splitter2.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 2 |
| 4 | gate3_merger3 | gate3_merger3.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 2 |
| 5 | gate4_gate5.1 | gate4_gate5.1.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 4 |
| 6 | gate5.1_gate5.2 | gate5.1_gate5.2.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 4 |
| 7 | gate5.2_splitter4 | gate5.2_splitter4.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 2 |
| 8 | gate6_merger5 | gate6_merger5.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 2 |
| 9 | gate7_splitter6 | gate7_splitter6.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 4 |
| 10 | merger0_gate1 | merger0_gate1.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 4 |
| 11 | merger1_gate2.1 | merger1_gate2.1.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 2 |
| 12 | merger2_splitter1 | merger2_splitter1.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 8 |
| 13 | merger3_gate4 | merger3_gate4.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 2 |
| 14 | merger4_splitter3 | merger4_splitter3.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 12 |
| 15 | merger5_gate7 | merger5_gate7.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 2 |
| 16 | splitter1_merger0 | splitter1_merger0.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 9 |
| 17 | splitter1_merger1 | splitter1_merger1.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 3 |
| 18 | splitter2_gate3 | splitter2_gate3.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 2 |
| 19 | splitter2_merger2 | splitter2_merger2.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 3 |
| 20 | splitter3_merger2 | splitter3_merger2.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 4 |
| 21 | splitter3_merger3 | splitter3_merger3.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 3 |
| 22 | splitter4_gate6 | splitter4_gate6.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 2 |
| 23 | splitter4_merger4 | splitter4_merger4.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 3 |
| 24 | splitter5_merger4 | splitter5_merger4.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 4 |
| 25 | splitter5_merger5 | splitter5_merger5.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 3 |
| 26 | splitter6_splitter5 | splitter6_splitter5.Segment | Accumulating | 2 | Per Minute | 1 | 9 |

Double-click here to add a new row.

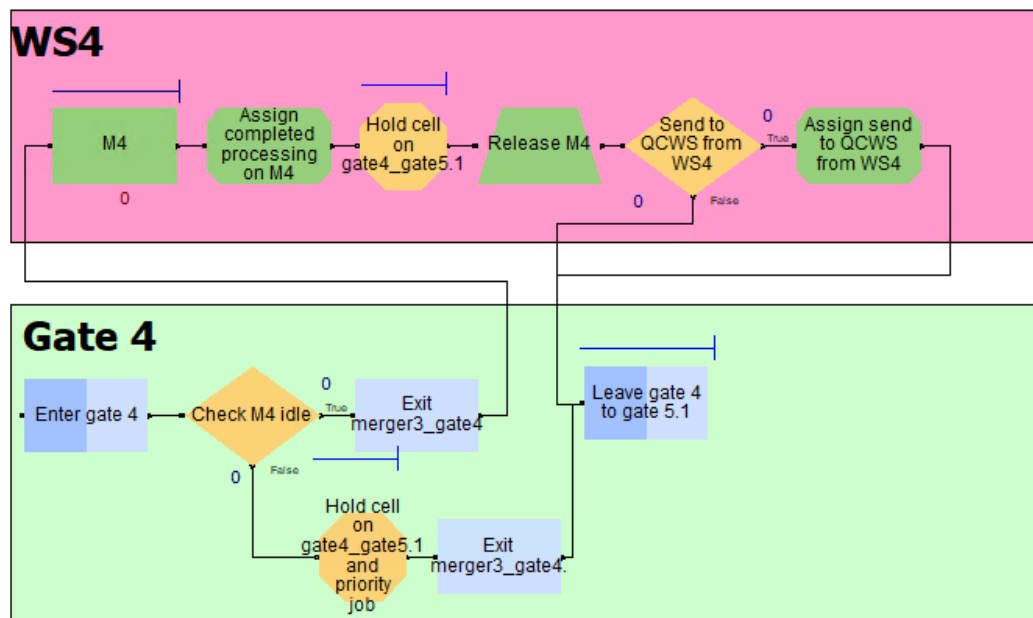
Quando il materiale entra nel sistema produttivo, la tipologia dell'entità cambia diventando un pezzo in lavorazione, l'istante di ingresso viene registrato come attributo e comincia la movimentazione sul conveyor e il processo di trasformazione attraverso le diverse fasi. Ogni segmento del nastro trasportatore ha una lunghezza pari a quella mostrata nel layout in Figura 3.2 e si muove alla stessa velocità che è costante e tale da rendere il sistema bilanciato, al netto dei ricircoli. Inoltre, essi sono progettati in modo da accumulare le entità e saturarsi completamente in caso di congestioni a valle.

Il conveyor è unico ma viene modellato come segmenti adiacenti con stessa velocità e lunghezza variabile per avere maggiore flessibilità e controllo locale. Esso è a spazi discreti, ovvero è costituito da unità dette "celle". Ciascun segmento di lunghezza N è suddiviso in N celle di dimensione unitaria che può contenere al massimo un pezzo alla volta. Inoltre, in caso di un blocco, i pezzi a monte della congestione si accumulano occupando tutte le celle vuote e senza lasciare spazi inutilmente liberi.



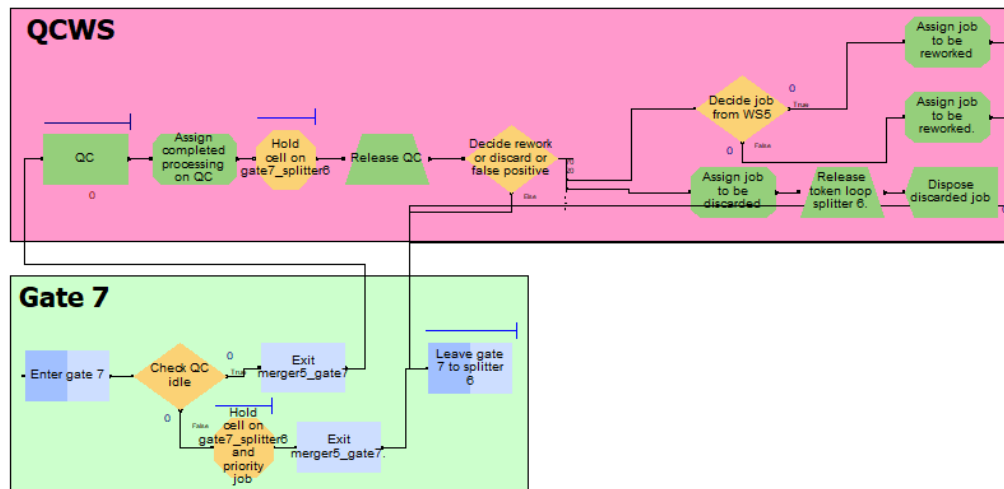
Gate, merger e splitter sono modellati come nodi logici che delimitano i segmenti di conveyor attraverso cui i pezzi fluiscono nel sistema e consentono di diramare o ricongiungere il flusso a seconda delle condizioni riportate nel diagramma di flusso in Figura 3.3. La sequenza è la seguente: l'entità entra nel nodo logico, lascia il conveyor a monte, è caricato su quello a valle e, infine, esce dalla stazione. Nello specifico, i gate e gli splitter hanno un conveyor in ingresso e due in uscita mentre i merger, al contrario, accolgono entità da due ingressi distinti per congiungere il flusso in un segmento unico.

Processo di lavorazione



Le macchine e il controllo qualità sono modellate come risorse con tempo di processo deterministico e capacità unitaria. Quando un pezzo è in lavorazione in una macchina, essa risulta occupata e quando la lavorazione è completata, la risorsa è rilasciata tornando disponibile. Non sono gestiti i fermi macchina.

Al termine di tutte le lavorazioni e all'uscita dal sistema le entità sono eliminate come prodotto finito.



Al completamento della lavorazione, i pezzi da inviare al controllo qualità sono etichettati con un attributo e conservano l'indicazione della lavorazione successiva da eseguire. Essi seguono lo stesso percorso degli altri pezzi attraverso il conveyor fino all'ultima stazione dove, se la risorsa è libera, sono controllati. Al termine del controllo, alcune entità sono eliminate come scarti, altre sono accettate e proseguono dalla lavorazione successiva e altre ancora devono essere rilavorate quindi ripetono la fase in cui il processo era stato interrotto. Le entità che rientrano nel flusso a seguito del controllo qualità non hanno alcuna priorità di lavorazione rispetto agli altri pezzi.

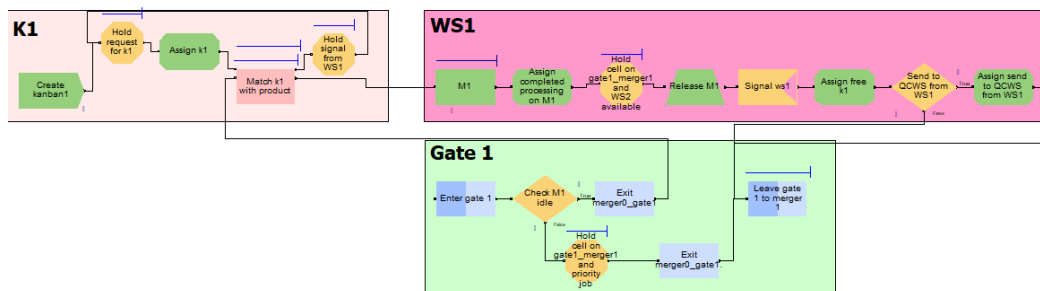
Monitoraggio degli output

All'interno del sistema viene effettuata una registrazione dettagliata di diversi indicatori chiave, tra cui il tempo medio di attraversamento dei pezzi, il throughput, il WIP e la quantità di pezzi scartati durante il controllo qualità. Per ogni pezzo che entra nel sistema, viene annotato l'istante di ingresso; al momento dell'uscita, si calcola il tempo totale di permanenza, così da raccogliere i dati necessari per determinare la media di attraversamento. Il throughput medio viene determinato sulla base del numero di ordini soddisfatti quotidianamente. Inoltre, Arena consente di monitorare automaticamente il WIP associato a ciascuna entità e il livello di saturazione delle macchine e dei loop. Infine, vengono registrati anche i pezzi scartati in fase di controllo qualità.

A.2 Implementazione delle logiche di controllo

Le logiche di controllo sono implementate nel modello costruito in Arena grazie all'utilizzo di nodi decisionali, blocchi di attesa condizionata e meccanismi di sincronizzazione delle entità. L'integrazione tra modello e controlli consente di governare il flusso, limitare il WIP e mantenere il sistema in condizioni operative stabili.

Sistema pull e kanban



Ogni workstation critica per l'accumulo di unità produttive, è dotata di una tipologia dedicata di cartellini kanban. Si tratta di entità differenti, ciascuna con il proprio flusso. Una volta creati, i cartellini sono trattenuti in un blocco di attesa condizionata fino alla ricezione di un segnale di autorizzazione della produzione. Ricevuto il segnale, il cartellino è rilasciato ed entra in un nodo di sincronizzazione delle entità. Tale nodo presenta due code distinte e combina un pezzo ad un cartellino per autorizzarne la produzione. L'associazione è puramente logica poiché il pezzo prosegue lungo il proprio flusso attraverso la macchina mentre il kanban resta trattenuto da un blocco di attesa condizionata in attesa del segnale di completamento della lavorazione. Una volta recepito tale segnale, il cartellino torna disponibile per successive autorizzazioni. Nel caso in cui non ci siano cartellini disponibili, il pezzo resta in attesa in una delle due code del nodo di sincronizzazione delle entità. A differenza delle altre entità, i kanban non escono dal flusso ma rimangono nel sistema per tutto il periodo di simulazione come risorse logiche permanenti.

La logica pull è realizzata attraverso una sequenza di segnali che si propagano dalla workstation più a valle verso quelle a monte. La medesima dinamica si ripete in ogni workstation controllata da kanban: ciascun cartellino attende il segnale proveniente dalla stazione a valle e genera un nuovo segnale verso la stazione a monte. In questo modo si instaura una catena di autorizzazioni garantendo che ogni fase del processo sia attivata

esclusivamente in risposta alla domanda reale. Per l'ultima stazione, la più a valle, il segnale è rappresentato dalla presenza di un ordine cliente in attesa di essere evaso.

Routing dinamico

Il conveyor, oltre che movimentare le entità, funge da vero e proprio buffer mobile perché tutti i pezzi nel sistema stazionano in una cella del nastro oppure sono in lavorazione in una macchina. Per questo non c'è la necessità di avere buffer intermedi ma, avendo una capacità limitata è indispensabile regolare localmente l'avanzamento dei pezzi attraverso nodi decisionali e blocchi di attesa condizionata.

Lungo l'intera linea, in ogni punto di accesso ad un tratto di conveyor è verificato, attraverso un blocco di attesa condizionata, che i vincoli di capacità siano rispettati: il pezzo può avanzare solo se è presente almeno una cella libera sul segmento a valle e se non è già presente un'entità in attesa di occuparla; diversamente viene trattenuto in tale blocco fino a che la condizione sia verificata. In altri termini, è necessario che il numero di celle occupate sia inferiore al numero totale di celle di ciascun tratto del conveyor. Inoltre, per gestire le precedenze dei flussi nei punti di confluenza come gate e merger, negli stessi blocchi di attesa condizionata sui rami non prioritari è verificata un'ulteriore condizione: il pezzo procede solo se non ci sono unità sul ramo prioritario in attesa di salire sul conveyor a valle.

In corrispondenza dei gate, un nodo decisionale controlla lo stato della risorsa e instrada di conseguenza il pezzo: se essa è libera verso la macchina, altrimenti verso il conveyor a valle.

Deadlock prevention

In corrispondenza dei merger del ramo principale (quello che dà accesso alle macchine) e degli splitter del ramo secondario (quello di ritorno), negli stessi blocchi di attesa condizionata che regolano il flusso sui conveyor, un'ulteriore condizione trattiene i pezzi: se in un loop è presente una sola cella libera, essa non può essere occupata poiché questo comporterebbe una situazione di deadlock. Tale controllo è realizzato modellando ciascun loop come risorsa con capacità pari al numero di celle di cui è costituito diminuito di una unità. Un pezzo occupa tale risorsa ogni volta che accede al loop (sia dal conveyor principale che da quello di ritorno) e la rilascia quando lo abbandona. Le entità, quindi, sono trattenute se le risorse sono sature.

A.3 Parametri della simulazione

| Componente simulativo | Parametro | Valore | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|---------------|------------|-----|
| Simulazione | Tempo totale di simulazione | 730 giorni | | |
| | Ore per giorno | 24 ore | | |
| | Warm-up period | 365 giorni | | |
| | Numero di repliche | 1 | | |
| Ordini | Tempo di arrivo | 20 minuti | | |
| | Entità per arrivo | 1 entità | | |
| Materiale | Numero di arrivi | 1 | | |
| | Entità per arrivo | 65000 entità | | |
| Cartellini kanban | Entità per arrivo | K1 | 1 entità | |
| | | K2 | 1 entità | |
| | | K3 | 1 entità | |
| | | K4 | 1 entità | |
| | Numero massimo di arrivi | 1 arrivo | | |
| Macchine | Tempi di processo | 1 | 20 min | |
| | | 2.1 | 40 min | |
| | | 2.2 | 40 min | |
| | | 3 | 20 min | |
| | | 4 | 20 min | |
| | | 5.1 | 20 min | |
| | | 5.2 | 20 min | |
| | | 6 | 20 min | |
| | Capacità | 1 entità | | |
| | Controllo qualità | Capacità | 1 entità | |
| Probabilità di invio dalla stazione i | | 15% | | |
| Probabilità di | | rilavorazione | 70% | |
| | | scarto | 20 % | |
| | | accettazione | 10% | |
| Conveyor | Velocità | 2 m/min | | |
| | Lunghezza segmenti | Da | A | |
| | | Merger 0 | Gate 1 | 4 m |
| | | Gate 1 | Merger 1 | 2 m |
| | | Merger 1 | Splitter 1 | 3 m |
| | | Splitter 1 | Merger 0 | 9 m |
| | | Merger 1 | Gate 2.1 | 2 m |
| | | Gate 2.1 | Gate 2.2 | 4 m |
| | | Gate 2.2 | Splitter 2 | 2 m |

| | | | | |
|------------|----------|------------|------------|------|
| | | Splitter 2 | Merger 2 | 3 m |
| | | Merger 2 | Splitter 1 | 8 m |
| | | Splitter 2 | Gate 3 | 2 m |
| | | Gate 3 | Merger 3 | 2 m |
| | | Merger 3 | Splitter 3 | 3 m |
| | | Splitter 3 | Merger 2 | 4 m |
| | | Merger 3 | Gate 4 | 2 m |
| | | Gate 4 | Gate 5.1 | 4 m |
| | | Gate 5.1 | Gate 5.2 | 4 m |
| | | Gate 5.2 | Splitter 4 | 2 m |
| | | Splitter 4 | Merger 4 | 3 m |
| | | Merger 4 | Splitter 3 | 12 m |
| | | Splitter 4 | Gate 6 | 2 m |
| | | Gate 6 | Merger 5 | 2 m |
| | | Merger 5 | Splitter 5 | 3 m |
| | | Splitter 5 | Merger 4 | 4 m |
| | | Merger 5 | Gate 7 | 2 m |
| | | Gate 7 | Splitter 6 | 4 m |
| | | Splitter 6 | Splitter 5 | 9 m |
| Token loop | Capacità | Da | A | |
| | | Merger 0 | Splitter 2 | 33 |
| | | Merger 0 | Splitter 4 | 65 |
| | | Merger 0 | Splitter 6 | 85 |
| | | Merger 1 | Splitter 2 | 21 |
| | | Merger 1 | Splitter 4 | 53 |
| | | Merger 1 | Splitter 6 | 73 |
| | | Merger 3 | Splitter 4 | 29 |
| | | Merger 3 | Splitter 6 | 49 |
| | | Merger 5 | Splitter 6 | 17 |

B. Report degli esperimenti

I principali risultati relativi a tempo di attraversamento, throughput, WIP, componenti del tempo totale nel sistema, saturazione delle risorse e dei loop sono riportati di seguito in valori medi.

| Scenario | base | 1 | 2 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|
| k1 | 1 | 1 | 10 |
| k2 | 1 | 2 | 20 |
| k3 | 1 | 1 | 10 |
| k4 | 1 | 1 | 10 |
| Tempo di attraversamento [h] | 26,92 | 21,84 | 22,05 |
| Throughput [pz/h] | 1,08 | 1,40 | 1,38 |
| WIP [pz] | 36,42 | 38,51 | 38,41 |
| Tempo a valore aggiunto [h] | 1,77 | 1,77 | 1,76 |
| Tempo a non valore aggiunto [h] | 0,51 | 0,51 | 0,50 |

| | | | |
|----------------------------------------|--------|--------|--------|
| Tempo di attesa [h] | 13104 | 13142 | 13100 |
| Tempo di trasferimento [h] | 17,21 | 15,27 | 15,08 |
| Tempo totale [h] | 13124 | 13160 | 13118 |
| Saturazione macchina 1 | 100% | 100% | 100% |
| Saturazione macchina 2.1 | 8,84% | 93,57% | 93,97% |
| Saturazione macchina 2.2 | 91,16% | 43,51% | 44,26% |
| Saturazione macchina 3 | 48,27% | 62,20% | 61,42% |
| Saturazione macchina 4 | 46,36% | 59,58% | 59,27% |
| Saturazione macchina 5.1 | 49,73% | 64,06% | 63,16% |
| Saturazione macchina 5.2 | 38,19% | 50,01% | 49,41% |
| Saturazione macchina 6 | 41,75% | 54,21% | 53,13% |
| Saturazione controllo qualità | 48,75% | 63,77% | 62,64% |
| Saturazione loop merger 0 - splitter 2 | 98,37% | 98,93% | 98,97% |
| Saturazione loop merger 1 - splitter 2 | 99,98% | 81,65% | 81,60% |
| Saturazione loop merger 0 - splitter 4 | 53,85% | 56,07% | 56,00% |
| Saturazione loop merger 1 - splitter 4 | 44,41% | 39,51% | 39,39% |
| Saturazione loop merger 3 - splitter 4 | 6,41% | 8,99% | 8,84% |
| Saturazione loop merger 0 - splitter 6 | 42,85% | 45,31% | 45,19% |
| Saturazione loop merger 1 - splitter 6 | 34,18% | 31,52% | 31,35% |
| Saturazione loop merger 3 - splitter 6 | 6,69% | 9,54% | 9,33% |
| Saturazione loop merger 5 - splitter 6 | 5,05% | 7,76% | 7,50% |