

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA
SCUOLA POLITECNICA

DIME

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA,
ENERGETICA, GESTIONALE E DEI TRASPORTI



TESI DI LAUREA

IN

INGEGNERIA GESTIONALE

**Simulazione di un Sistema Logistico a
Magazzino con Picking Multi-Livello**

Relatore:

Prof. Enrico Zero

Allievo:

Sohayb Raqaq

Febbraio 2026

Simulazione di un Sistema Logistico a Magazzino con Picking Multi-Livello

Sommario

Lo studio analizza un magazzino multilivello tramite simulazione a eventi discreti, viene valutata l'integrazione tra veicoli a guida autonoma per il picking e ascensori per i collegamenti verticali. La ricerca nasce dalla necessità di analizzare le risorse verticali condivise poiché, nei sistemi multilivello, i ritardi accumulati in queste fasi si riflettono direttamente sull'aumento dei tempi di completamento degli ordini. Il processo è stato modellizzato in AnyLogic, includendo la logica di assegnazione delle missioni agli AGV e l'interazione con i lift. A parità di condizioni (layout, risorse e carico), il confronto si è focalizzato sulle logiche di dispatching del blocco Retrieve: le strategie Nearest to agent e Shortest path to pickup location sono state così valutate in modalità free space. Le prestazioni dei lift sono state valutate tramite KPI estratti direttamente nel modello, tra cui tempo completamento ordine, ripartizione dei tempi operativi degli AGV, utilizzo e coda dei lift, e tempi di attesa cumulati. I risultati mostrano che la scelta della policy influenza sia i tempi di avvicinamento al prelievo sia la distribuzione della congestione verticale; nello scenario analizzato Nearest migliora il lead time e alleggerisce il lift più critico, pur mantenendo quasi invariata l'attesa verticale totale.

Simulation of a Warehouse Logistic System with Multi-Level Picking

Abstract

This study analyzes a multi-level warehouse using discrete event simulation. It evaluates the integration between AGVs for picking and lifts for vertical movements. The research starts from the need to analyze shared vertical resources because, in multi-level systems, delays in these phases increase the total order completion time. The process was built in AnyLogic, including the logic for AGV missions and the interaction with lifts. Using the same layout, resources, and load, the study compares two dispatching policies: Nearest to agent and Shortest path to pickup location, with free space navigation. Performance was measured with KPIs from the model, such as completion time, AGV operating times, lift usage, and waiting times. The results show that the policy choice affects both travel times and vertical congestion. In this scenario, the Nearest policy improves the lead time and reduces the load on the most critical lift, while the total vertical waiting time remains almost the same.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Professore Enrico Zero per la disponibilità, la guida e il supporto forniti durante lo sviluppo di questo lavoro di tesi, nonché per avermi dato l'opportunità di svolgere il tirocinio sotto la sua supervisione.

Ringrazio la mia famiglia e tutte le persone che mi hanno sostenuto durante il mio percorso universitario.

Indice

Sommario	i
Abstract	ii
Ringraziamenti	iii
1 Introduzione	1
2 Stato dell'arte	3
2.1 Il magazzino come sistema logico integrato	3
2.1.1 Processi operativi	4
2.1.2 Sistemi di movimentazione e automazione	5
2.1.3 Indicatori di prestazioni (KPI)	6
2.2 Il picking nel sistema magazzino	7
2.2.1 Strategie di picking	8
2.2.2 Paradigmi di esecuzione e problemi decisionali	9
2.2.3 Tecnologie di supporto al picking	11
2.3 Picking multilivello	12
2.3.1 Criticità operative	13
2.4 Simulazione nei sistemi magazzino	14
2.4.1 Strumenti software	15
2.4.2 Ambiti applicativi e integrazioni avanzate	16
3 Metodologia	21
3.1 DES applicato ai magazzini multilivello	21
3.2 Ambiente di simulazione	21
3.3 Simulazione	23
3.3.1 Logica di processo e gestione delle risorse	24
3.3.2 Layout multi-livello, lift e regole di accesso	27
4 Risultati	30
4.1 KPI	31

4.2	Raccolta dati e definizione scenari di confronto	33
4.2.1	Utilizzo operativo degli AGV	33
4.2.2	Tempo di attraversamento	34
4.2.3	Tasso di utilizzazione degli agv	35
4.2.4	Congestione verticale	36
4.3	Analisi risultati	40
5	Conclusione	42
	Riferimenti Bibliografici	44

1 Introduzione

Negli ultimi anni i magazzini stanno diventando sistemi sempre più complessi, sia per l'aumento della varietà degli articoli gestiti sia per la richiesta di tempi di evasione sempre più rapidi. In questo contesto, il picking (cioè l'insieme delle operazioni di prelievo degli articoli per preparare gli ordini) continua a rappresentare una delle attività più costose e più sensibili ai ritardi, perché coinvolge direttamente movimentazioni, sincronizzazioni tra risorse e possibili congestioni. La complessità aumenta ulteriormente quando il magazzino è multilivello, cioè distribuito su più piani: in questi casi una parte rilevante delle prestazioni dipende dai flussi verticali, che introducono vincoli di capacità e tempi di attesa difficili da stimare a priori.

Dentro un magazzino multilivello i veicoli di movimentazione orizzontale e le risorse verticali devono coordinarsi: quando più missioni richiedono lo stesso ascensore, il sistema può generare code e tempi di attesa che si propagano sull'intero processo. Di conseguenza, una scelta operativa elementare (ad esempio la regola di immissione di un veicolo di trasporto) influenza le prestazioni globali; questo a partire dal tempo di evasione dell'ordine, al bilanciamento delle risorse fino alla possibile formazione di colli di bottiglia.

Il presente lavoro si pone l'obiettivo di simulare un sistema logistico di magazzino basato su picking multilivello. L'analisi si concentra in particolare sul contributo delle risorse verticali e sull'impatto operativo che le diverse logiche di assegnazione degli ordini generano sulle prestazioni complessive. Il lavoro è stato sviluppato in AnyLogic, costruendo un modello che rappresenta il comportamento del sistema e consente di osservare in modo controllato l'impatto di scelte decisionali specifiche. Per costruire la simulazione si è partiti dalla base logica unendo i blocchi funzionali. Successivamente è stato realizzato il disegno 2D e come ultimo passaggio è stato generato l'ambiente 3D completo. Il sistema rappresentato è un magazzino a quattro piani che sfrutta la parametrizzazione: questa funzione permette di variare il numero di AGV (Automated Guided Vehicles) in gioco, anche

se la scelta finale è ricaduta sull'utilizzo di 8 di questi per le prove effettuate. Le decisioni sulla struttura sono state guidate dalla necessità di studiare le criticità del flusso. Si è scelto di inserire due ascensori per velocizzare l'attraversamento e per avere la possibilità di confrontare i colli di bottiglia tra il primo e il secondo ascensore. Per garantire un confronto equo, si è deciso di posizionare le 2 basi degli AGV al piano terra, assicurando così le stesse condizioni di partenza per ogni mezzo. Anche il punto di scarico degli ordini si trova al piano terra. Naturalmente, trattandosi di un modello teorico, tutti i dati di input sono stati generati sinteticamente in coerenza con il layout disegnato.

La simulazione è stata utilizzata come strumento di analisi per valutare, a parità di layout e risorse, come cambiano le prestazioni modificando le regole operative. Il confronto verte in particolare sulle politiche di dispatching: Nearest to agent e Shortest path to pickup location, mantenendo gli AGV in free space. L'obiettivo è stabilire se queste strategie migliorino le performance globali o se generino ulteriori colli di bottiglia e tempi d'attesa nella componente verticale. Per rendere il confronto significativo, è stato necessario definire e monitorare una serie di indicatori di prestazione KPI (Key Performance Indicators) misurabili direttamente nel modello. L'analisi si concentra su tre famiglie di aspetti: i tempi (ad esempio il tempo complessivo fino al deposito), l'impiego delle risorse (stati operativi degli AGV e utilizzo delle risorse verticali) e la congestione verticale (code e tempi di attesa associati agli ascensori). Tali indicatori servono a testare la solidità del sistema in condizioni di sovrasaturazione. L'analisi mette in luce il legame tra i flussi orizzontali e quelli verticali e sfrutta i KPI per chiarire l'origine delle prestazioni perché l'obiettivo non è solo individuare la strategia migliore ma capire come si formano le code e come viene distribuito il lavoro.

2 Stato dell'arte

2.1 Il magazzino come sistema logico integrato

Il magazzino è il nodo fisico centrale della catena di fornitura. È considerato l'elemento chiave che trasforma la strategia della Supply Chain in un'operatività quotidiana efficiente. Proprio al suo interno, infatti, gli obiettivi di servizio, i costi e i vincoli fisici si incontrano e si traducono in decisioni operative concrete: la gestione delle scorte, la definizione delle priorità di movimentazione e l'ottimizzazione nell'uso delle risorse. Il magazzino ricopre così una funzione sistemica essenziale, perché collega i diversi piani aziendali. Questo ruolo va dal bilanciare la disponibilità di prodotto con la variabilità della domanda, al sincronizzare le attività interne (ricevimento, stoccaggio, picking e spedizione), fino all'indispensabile allineamento con la produzione e le strategie di trasporto.

A seconda della natura della domanda, il ruolo operativo del magazzino muta: se le richieste sono standardizzate, l'obiettivo è stabilizzare i flussi e i livelli di stock; se, invece, la domanda è più volatile o personalizzata, la priorità si sposta sul corretto sequenziamento degli ordini, sull'efficienza del consolidamento e sulla riduzione dei tempi di evasione. In ogni contesto, il magazzino resta un nodo di coordinamento vitale, capace sia di gestire aspetti critici (come colli di bottiglia, instradamento della merce e logiche di rifornimento), sia di tradurre le decisioni strategiche della rete in risultati operativi misurabili. Per svolgere questo ruolo serve visibilità: lo stato delle unità di carico, la saturazione delle aree e l'avanzamento delle missioni devono essere tracciati in tempo reale. Senza dati tempestivi, le politiche restano solo sulla carta e le correzioni arrivano troppo tardi. È qui che emerge il ruolo degli smart warehouse: la vera differenza non la fa una singola tecnologia, ma l'integrazione tra tracciabilità, sistemi di governo (WMS/WCS) e automazioni modulari. Questo approccio sistemico non solo standardizza i tempi, ma abilita anche politiche dinamiche che rispettano l'integrità del flusso logistico [1].

2.1.1 Processi operativi

I processi svolti all'interno del magazzino formano una catena operativa continua in cui il flusso di informazioni assume un ruolo direttivo cruciale, guidando in ogni sua fase il movimento fisico della merce.

- Il **ricevimento** è il primo snodo: riconcilia documenti e unità in ingresso, verifica quantità e qualità, assegna un'identità operativa a colli e pallet che saranno le future unità di carico (UDC) e registra gli eventi nel sistema, così da rendere disponibili i dati per gli step successivi. L'efficacia del ricevimento dipende dalla pulizia informativa e dalla rapidità di registrazione: identificazioni coerenti, etichette leggibili e acquisizione automatica (es. barcode/RFID) riducono rilavorazioni e tempi morti, evitando che le anomalie si propaghino al resto del flusso [1].
- Le **fasi di stoccaggio e rifornimento** sono cruciali per l'efficienza del picking. La prima permette di tradurre il layout fisico del magazzino in regole di assegnazione (es. politiche ABC o per famiglie) con l'obiettivo di minimizzare percorrenze e interferenze, rispettando vincoli di sicurezza, rotazione e compatibilità. Successivamente il rifornimento agisce da cerniera tra le scorte di riserva e le linee di prelievo. È fondamentale che il suo calendario venga studiato per prevenire eventuali rotture di stock locali senza congestionare i corridoi o competere con i picker. Pertanto, questa operazione raggiunge la sua massima efficienza se regolata da soglie di attivazioni semplici e supportata da aggiornamenti frequenti.
- Il **picking** agisce come processo di evasione degli ordini, prelevando gli articoli necessari dalle loro ubicazioni di stoccaggio. La sua efficienza condiziona l'intero flusso a valle, determinando i tempi di attesa per le fasi successive.
- Il **consolidamento** interviene subito dopo, ricostituendo l'unità degli ordini, verificandone la completezza, la compatibilità degli articoli e la corretta destinazione finale. Il ciclo si conclude con la spedizione, che si occupa di

trasformare i singoli colli in unità di trasporto, consegnando al vettore un flusso di merce la cui validità è stata precedentemente accertata.

L'efficienza operativa di tutte le fasi descritte dipende in modo cruciale dalla qualità della tracciabilità e dell'osservabilità. In termini concreti, significa che lo stato delle unità di carico, l'avanzamento delle missioni e la saturazione dei nodi devono essere dati disponibili e aggiornati. Solo disponendo di queste informazioni in tempo utile, infatti, si può garantire che le decisioni locali (operative) restino allineate agli obiettivi strategici (servizio e costo), evitando così che si creino colli di bottiglia nascosti [1]. Queste dinamiche operative sono influenzate da una decisione strategica fondamentale: il Punto di Disaccoppiamento dall'Ordine Cliente (CODP). La posizione di questo punto cambia le priorità del magazzino: se il CODP è posizionato "a monte" (lontano dal cliente finale), il sistema tenderà a privilegiare la stabilità e il livellamento dei carichi di lavoro. Se invece il CODP si sposta "a valle" (più vicino al cliente), diventano cruciali l'assegnazione delle priorità e la capacità di adattarsi in tempo quasi reale. In entrambi gli scenari, la coerenza dei processi è garantita solo se le strategie generali (politiche di rete) vengono tradotte in regole operative chiare e misurabili [2].

2.1.2 Sistemi di movimentazione e automazione

I flussi operativi dipendono da un'infrastruttura abilitante, che svolge sia una funzione di supporto fisico sia di coordinamento informativo. Nei sistemi logistici manuali, questa infrastruttura si basa su componenti essenziali come transpallet, carrelli commissionatori e postazioni di lavoro. Tuttavia, l'aumento dei volumi e della varietà della merce richiede l'adozione di soluzioni più complesse. Queste includono i conveyor, cruciali per collegare aree con ritmi operativi diversi, e i sorter, per smistare i flussi, fino ai sistemi Goods-to-Person. Quest'ultima categoria comprende tecnologie come AS/RS, shuttle o Magazzini Verticali Modulari (VLM), che minimizzano le percorrenze e lo sforzo fisico. La scelta della giusta tecnologia è guidata dalla compatibilità tra il profilo della domanda (ordini), la geometria del layout e i vincoli di capacità operativa. Questa compatibilità, inoltre, è ancora più critica nei sistemi multilivello; infatti, ogni passaggio verticale

introduce propri tempi ciclo e rischi di congestione, che possono facilmente annullare i guadagni di efficienza ottenuti sui singoli piani.

Sul piano del coordinamento, il successo dell'automazione dipende dal dialogo sinergico tra le diverse “regie” software. Esiste infatti una chiara gerarchia: al vertice, il WMS (Warehouse Management System) gestisce le logiche di ubicazione, le priorità e lo stato generale degli ordini. Un livello sottostante, il WCS (Warehouse Control System), traduce tali missioni in comandi specifici per l'hardware (come AS/RS, AGV o AMR). Infine, i sistemi a bordo macchina forniscono il feedback, comunicando lo stato operativo effettivo in tempo reale. Se manca una regola comune per l'assegnazione e l'instradamento (routing), i singoli mezzi, pur ottimizzando il loro compito localmente, finiscono per creare conflitti nei nodi condivisi, in particolare nei critici passaggi tra piani. Per coordinare il flusso è quindi cruciale l'integrazione tra AGV/AMR, AS/RS e WMS [3].

L'integrazione della componente digitale chiude il cerchio. Strumenti come barcode/RFID, sensori, sistemi di visione e dispositivi wearable generano i dati di campo essenziali per la tracciabilità e la visibilità di stato. Questo flusso di dati viene poi veicolato rapidamente ai livelli di controllo tramite API e standard di comunicazione, assicurando decisioni tempestive basate sulla situazione reale e non su dati obsoleti. Avendo a disposizione dati così affidabili, diventa possibile regolare l'allocazione dei compiti, l'instradamento e le logiche di rifornimento con un set limitato di regole chiare e comprensibili per il personale. In conclusione, un sistema di movimentazione di successo viene giudicato dalla sua capacità di garantire tempi ripetibili, minimizzare i conflitti e creare le condizioni per implementare scelte dinamiche e ponderate.

2.1.3 Indicatori di prestazioni (KPI)

I Key Performance Indicators (KPI) rappresentano il connettore logico tra le decisioni operative e i risultati misurabili.

Il modello di analisi si concentra su tre dimensioni fondamentali:

- tempi di ciclo
- capacità
- accuratezza

Il peso di questi KPI dipende dalla posizione del CODP [2]. Se il disaccoppiamento è vicino al cliente, si favorisce la rapidità di esecuzione e la gestione delle urgenze. Se invece è lontano, si privilegiano l'equilibrio delle scorte e la costanza dei flussi di rifornimento. Analizzando i tempi di ciclo, il fattore determinante non è la distanza, ma la differenza tra tempo attivo (movimento) e tempo passivo (attesa). Nei sistemi multilivello, le prestazioni sono infatti governate dalle code ai punti di connessione verticale (come elevatori o VLM) e dal riempimento dei micro-buffer. Di conseguenza, l'analisi si concentrerà non solo sul lead time complessivo, ma anche sui tempi di attesa in ogni snodo e sui tempi di processo nelle stazioni.

Come sottolinea [1], questi indicatori sono efficaci solo se la tracciabilità e la visibilità sono affidabili. Senza dati precisi, le misurazioni sono inutili e le correzioni che ne derivano non funzionano. Per quanto riguarda la capacità, l'analisi si concentra su quanto produce (il throughput) il vero collo di bottiglia del sistema. Tuttavia, per essere sicuri di aver risolto il problema (e non solo di averlo spostato altrove), non basta guardare questo numero. Bisogna leggerlo insieme ad altri due dati: quanto quella risorsa sta effettivamente lavorando "tasso di utilizzo" e quanto tempo passa ferma "tempi di inattività forzata", ad esempio perché bloccata da conflitti o in attesa di materiale. L'analisi si chiude con l'accuratezza, che conta gli errori (picking sbagliato, rilavorazioni). Questo dato è fondamentale, perché la gestione degli errori costa molto all'azienda e peggiora la qualità percepita dal cliente.

2.2 Il picking nel sistema magazzino

Il picking è il processo di evasione ordini in cui la domanda, formalizzata in righe, si traduce in missioni di prelievo fisico. In letteratura è riconosciuto come

attività ad alta intensità di manodopera e con impatto rilevante sui costi operativi complessivi [4]. La sua configurazione incide direttamente su tempo di evasione e accuratezza (cfr. §2.1.3). L'efficienza del picking non discende da un singolo fattore ma dall'integrazione coerente di quattro leve:

- strategie di picking (es. batching, zoning, waving),
- paradigma di esecuzione (picker-to-parts / parts-to-picker),
- problemi decisionali formalizzati – Order Batching Problem (OBP), Picker Routing Problem (PRP), Storage Location Assignment Problem (SLAP),
- tecnologie di supporto all'operatore.

2.2.1 Strategie di picking

Le strategie di picking definiscono le logiche con cui gli ordini vengono prima organizzati e poi rilasciati al sistema di prelievo.

Nello zone picking, il layout è partizionato in aree di competenza: gli operatori, assegnati a una singola zona, processano solo le righe d'ordine relative agli articoli ivi stoccati. Gli ordini multi-zona vengono completati tramite passaggio sequenziale tra aree (modalità pick-and-pass, che può generare code e complessi bilanciamenti di carico) oppure tramite prelievi paralleli con consolidamento in un'area dedicata. Questa strategia riduce i percorsi dei singoli operatori e favorisce la specializzazione, ma introduce un potenziale collo di bottiglia proprio nella fase di consolidamento, che richiede sincronizzazione molto accurata.

Il wave picking rilascia gli ordini al sistema in lotti discreti (onde) a intervalli pianificati, tipicamente allineati alle scadenze di spedizione; con l'obiettivo di migliorare il coordinamento con le partenze e consentire un livellamento del carico di lavoro sul turno, a scapito della reattività a urgenze e last-minute [5].

Il batch picking prevede che un operatore prelevi, con un unico tour, gli articoli necessari a evadere più ordini contemporaneamente, riducendo drasticamente la distanza media per riga e incrementando il throughput (produttività oraria) del

sistema [5]. Di contro, impone uno smistamento (sorting) indispensabile per ricomporre i singoli ordini. Tale attività comporta costi e tempi aggiuntivi che, se non gestiti correttamente, possono spostare il collo di bottiglia sul post-picking.

In contesti avanzati, l'automazione flessibile (es. flotte di AMR) consente di ibridare dinamicamente queste strategie, modificando l'aggregazione degli ordini o l'assegnazione alle zone in risposta al carico in tempo reale [3]. Le strategie si declinano poi operativamente secondo il paradigma di esecuzione adottato come descritto nel sottoparagrafo successivo.

2.2.2 Paradigmi di esecuzione e problemi decisionali

I paradigmi di esecuzione definiscono il rapporto fisico tra l'operatore e la merce. Nel metodo tradizionale Picker-to-Parts (PtP), o “uomo alla merce”, è l'operatore che si muove per raggiungere gli articoli, spostandosi a piedi o con un carrello. Questo approccio è molto flessibile e costa poco all'inizio, ma ha un'inefficienza di fondo: la maggior parte del tempo non è spesa per prelevare, ma per attività che non danno valore (NVA), come camminare o cercare la locazione giusta. Questo, ovviamente, riduce la produttività [5]. Per superare questo problema, sono nati i sistemi Parts-to-Picker (PtG), o “merce all'uomo”. Qui, l'operatore opera da una postazione fissa, ricevendo la merce (l'unità di carico, UDC) che viene movimentata automaticamente verso di lui, che si tratti di uno scaffale intero, una cassetta o un vassoio.

Alcuni esempi di tecnologie PtG sono i magazzini automatici (AS/RS), i sistemi a navetta (shuttle) o le flotte di robot (AMR) che portano le scaffalature all'operatore. Il vantaggio principale del PtG è che azzerà quasi del tutto il tempo di spostamento dell'operatore. Questo permette di raggiungere una produttività (throughput) per stazione molto alta, migliorando allo stesso tempo l'accuratezza (meno errori) e l'ergonomia (meno fatica) [6]. Il vero punto critico dei sistemi PtG, però, non è la velocità del robot, ma l'intelligenza del software (WMS/WCS) che lo comanda. È il software, infatti, che deve organizzare un sequenziamento perfetto delle UDC (le unità di carico) per evitare che l'operatore resti fermo in

attesa tra un prelievo e l'altro [3]. Sia questo paradigma che quello precedente, comunque, devono risolvere alcuni problemi “classici” del picking.

Per rendere efficiente il picking, bisogna risolvere alcuni problemi “classici”. Il primo è l'Order Batching Problem (OBP), basato sul decidere come raggruppare più ordini dei clienti in un unico “lotto” (batch) di prelievo. L'obiettivo è mettere insieme ordini che chiedono articoli “vicini” tra loro, così da minimizzare la distanza totale da percorrere. È un problema complesso da calcolare e impone un trade-off: si guadagna efficienza nel prelievo, ma si rischia di allungare il tempo di attesa (lead time) per i primi ordini che finiscono nel lotto.

Una volta creato il lotto, bisogna risolvere il Picker Routing Problem (PRP), cioè decidere il “giro” (tour) migliore per visitare tutte le locazioni di prelievo. Visto che questo è una variante del “problema del commesso viaggiatore” (TSP), cercare la soluzione perfetta al 100% in un contesto reale non è pratico. Per questo, la letteratura ha validato diverse euristiche molto efficaci, come la strategia S-shape (o “a serpentina”), che obbliga a un percorso fisso lungo i corridoi, o la Return (che divide il corridoio a metà). Queste euristiche sono un ottimo compromesso tra semplicità e riduzione dei tempi di percorrenza [5].

Le prestazioni di OBP e PRP sono, a loro volta, massimizzate da un efficace Storage Location Assignment Problem (SLAP), o slotting. Lo SLAP definisce la politica di allocazione degli SKU nelle locazioni di magazzino. Si può andare da uno stoccaggio “randomizzato” (casuale, che però massimizza l'uso dello spazio) a politiche basate sulla popolarità (come l'analisi ABC). Quest'ultima strategia posiziona gli articoli a più alta rotazione nelle locazioni più comode (vicino all'uscita o a un'altezza facile da raggiungere). La vera efficacia, però, risiede nella sinergia tra queste decisioni. Questi studi [5] hanno infatti dimostrato che l'applicazione congiunta di una politica di slotting basata sulla frequenza (ABC) e di un'euristica di routing efficiente (come l'S-shape) porta a riduzioni significative dei tempi di percorrenza rispetto a politiche di stoccaggio casuali.

2.2.3 Tecnologie di supporto al picking

Le tecnologie di supporto al picking sono abilitatori fondamentali per migliorare le prestazioni a livello del singolo operatore, agendo primariamente sull'accuratezza e sulla riduzione dei tempi ciclo. L'evoluzione ha visto il superamento delle liste di prelievo cartacee grazie ai terminali in radiofrequenza (RF), che tramite la scansione di codici a barre guidano l'operatore e impongono una conferma digitale del prelievo, abbattendo drasticamente gli errori di picking. Tecnologie emergenti, come il vision picking (che utilizza smart glasses per proiettare informazioni visive nel campo visivo dell'operatore) o l'uso di RFID, sono tra le soluzioni più studiate negli smart warehouse; nel caso degli smart glasses l'obiettivo è supportare l'operatore e aumentare l'efficienza, ma la letteratura evidenzia anche possibili impatti su comfort[1].

Un passo ulteriore è rappresentato dal voice picking (o pick-by-voice): l'operatore riceve istruzioni tramite un auricolare e conferma le operazioni tramite comandi vocali. Questa tecnologia permette all'operatore di concentrarsi sul prelievo e sulla guida del mezzo [7]. Nei contesti PtP ad alta intensità, sono diffusi i sistemi pick-to-light: display luminosi installati su ciascuna locazione indicano all'operatore la posizione e la quantità da prelevare; l'operatore conferma il prelievo premendo un pulsante. Questi sistemi minimizzano i tempi di ricerca e conferma, offrendo throughput molto elevati, ma a fronte di una minore flessibilità infrastrutturale [5].

L'integrazione di queste tecnologie con i sistemi di gestione (WMS) è un pilastro degli "smart warehouses", in cui la visibilità e la reattività garantite dai dati in tempo reale permettono un controllo di processo avanzato. Nei contesti multilivello, tali tecnologie incidono soprattutto sui varchi verticali e sui buffer d'interscambio, temi discussi in §2.3.

2.3 Picking multilivello

Il picking multilivello definisce le operazioni di prelievo svolte in strutture dotate di più piani di stoccaggio. Questi piani sono tipicamente serviti da corridoi orizzontali e interconnessi da elementi verticali, quali elevatori (nei sistemi automatici) o talvolta rampe (nei sistemi manuali). Eventuali passaggi trasversali (cross-aisle) agiscono come punti di interscambio. La particolarità di questa configurazione è l'introduzione della dimensione verticale nei percorsi: il tempo di ciclo dipende dalla somma (e dall'interferenza) tra movimenti sul piano e attraversamenti verticali, più le attese su risorse condivise (elevatori/stazioni).

Sistemi manuali Nei magazzini manuali multi-livello, i tempi di retrieval (recupero merce) e le distanze percorse dipendono da tre scelte progettuali fondamentali che richiedono coordinamento. L'inefficienza di tale coordinamento porta all'insorgere di congestioni locali, blocchi nelle corsie strette e code sugli elevatori; queste problematiche verranno approfondite nel §2.4. La prima è il layout fisico, ovvero la configurazione geometrica dell'impianto: questa definisce il posizionamento di corridoi, passaggi trasversali (cross-aisle), stazioni di Input/Output (il "deposito") e sistemi di collegamento verticale. Il layout, di fatto, vincola i percorsi di movimentazione. La seconda decisione riguarda le politiche di assegnazione, che determinano dove posizionare i codici articolo (SKU). L'allocazione può essere random (primo slot disponibile), dedicata (slot fissi per SKU) o class-based. Quest'ultima strategia segmenta il magazzino in zone (es. A/B/C) in base alla frequenza di richiesta, collocando gli articoli a più alta movimentazione (Classe A) prossimi alle stazioni di ingresso uscita.

La terza scelta è il routing, ossia la strategia di percorso per evadere la lista di prelievo. L'operatore può adottare un percorso transversal (attraversamento dei corridoi), return (entrata e uscita dal corridoio dallo stesso lato, fino al prelievo più lontano) o combined (selezione della strategia più efficiente caso per caso, ad esempio in base alla densità di pick nel corridoio).

Sistemi automatici In contesti automatici, i moderni sistemi parts-to-picker multilivello tendono ad accoppiare shuttle dedicati per livello, buffer intermedi ed elevatori (o mini-load); in queste configurazioni si integrano spesso anche moduli VLM (Vertical Lift Modules). La modellazione multi-method evidenzia che l'integrazione di VLM con sistemi buffer/shuttle modifica in modo misurabile il throughput e il tempo di ciclo rispetto a soluzioni VLM stand-alone. Questo avviene perché i profili di velocità, le distanze e i vincoli imposti dal collegamento verticale risultano parametri ad alta influenza nel caso di studio analizzato. La simulazione risulta quindi necessaria per calibrare tali parametri prima di definire il layout definitivo. Questa spinta all'automazione trova una precisa motivazione di tipo economico. Storicamente, l'attività di order picking rappresenta circa il 55% dei costi operativi di magazzino [4], giustificando gli investimenti in configurazioni complesse con l'obiettivo di ridurre le percorrenze, soprattutto le attese sugli elementi verticali.

2.3.1 Criticità operative

L'analisi dei sistemi multilivello evidenzia criticità fisiche e strutturali, prima fra tutte lo scambio verticale. Se i flussi si concentrano o gli elevatori sono sottodimensionati, si genera una reazione a catena: saturazione dei buffer, attesa delle navette e incremento del tempo di ciclo. Come evidenziato in [4] per VLM e shuttle, questa interazione verticale può diventare vincolante. Nei sistemi manuali, vige un principio analogo di interdipendenza: la coerenza tra layout, assegnazione e routing è cruciale. Configurazioni disallineate, specie con narrow aisles e alta pick density, aumentano in modo significativo le percorrenze e i tempi di retrieval [5].

Oltre ai problemi strutturali, ci sono quelli “logico-gestionali”.

1. **Conflitti di priorità:** Con così tante corsie e stazioni, è facile creare conflitti. Ad esempio, una scelta che sembra veloce per una singola zona (una “scelta locale”) può finire per peggiorare il tempo di evasione totale (lead time) dell'intero sistema.

2. **Il bottleneck che si sposta:** Allo stesso modo, i problemi possono nascere dopo il picking. Le regole a valle (come l'imballaggio o packing) possono creare nuove code, finendo per "spostare il collo di bottiglia" più avanti nel processo [8].
3. **Rischio tecnico** (Deadlock): Nei sistemi automatici, la complessità logica diventa un rischio tecnico. Sincronizzare in modo rigido tutti i sistemi (navette, elevatori, AGV) può creare dei deadlock, cioè delle "attese circolari" (dove A aspetta B, e B aspetta A). Questo blocca tutto e crea forte variabilità nei tempi [6].
4. **Problema dinamico** (Squilibrio): Infine, l'equilibrio del sistema è "fragile" e cambia nel tempo. Un'allocazione della merce (SKU) che oggi è ottimale, può diventare sbilanciata tra qualche mese (a causa di una domanda asimmetrica), generando code fisse su certi livelli o elevatori [9], con effetti negativi che si accumulano.

2.4 Simulazione nei sistemi magazzino

L'impiego della simulazione consente di collaudare le decisioni di magazzino senza interferire con l'operatività. Questo strumento permette di confrontare diverse configurazioni fisiche e regole di controllo, misurandone l'impatto su tempo di ciclo, throughput, percorrenze, utilizzo delle risorse, WIP e, se rilevante, sui consumi energetici.

Il sistema metodologico che permette di raggiungere questi obiettivi è il DES (Discrete Event Simulation), riferimento per gli scenari a eventi discreti. L'approccio ABM (Agent-Based Modeling) diventa necessario quando si richiede che i comportamenti locali emergano in modo autonomo e interagiscano con i vincoli di risorsa, come nel caso della logica di una navetta o della reazione a un blocco su un elevatore. Nei sistemi verticali multi-livello (VLM, buffer, shuttle), in alcuni studi recenti si impiega un modello ibrido DES+ABM: il DES governa le code e la capacità, mentre l'ABM modella gli agenti e le loro regole di coordinamento

[4]. Quando poi lo spazio degli esperimenti (sia DES che ABM) diventa troppo vasto (per numero di parametri, repliche o obiettivi), si impiegano i metamodelli (o surrogati). La loro precisione è comunque sufficiente per supportare il processo decisionale, e viene misurata tramite metriche di errore come il MAE (Mean Absolute Error) e il MAPE (Mean Absolute Percentage Error) consentendo di effettuare analisi what-if estese con tempi di calcolo notevolmente ridotti [6]. Le scelte metodologiche qui delineate indirizzano la scelta degli strumenti software (§2.4.1) e trovano impiego negli ambiti applicativi documentati in letteratura 2.4.2.

2.4.1 Strumenti software

La scelta della piattaforma segue criteri tecnici e risponde a logiche rigorose e precise. Si distinguono quindi contesti in cui è sufficiente il DES (progettato per eventi, code e risorse), da quelli che invece richiedono l'impiego di ambienti multi-metodo (necessari per modellare agenti e processi complessi). Gli indicatori di prestazione (KPI) di riferimento restano quelli già definiti nel §2.1.3; l'analisi si concentra in particolare sul mezzo tecnico usato dai vari studi per misurare questi indici in modo oggettivo e tracciabile.

Gli ambienti DES (tra cui troviamo soluzioni note come Arena, Anylogic, FlexSim, Simul8 o framework quali SimPy) rappresentano la scelta più naturale quando l'obiettivo dello studio è la valutazione di politiche di flusso per ridurre tempi e percorrenze. Il modello DES, infatti, permette di esplicitare tutti gli elementi fondamentali come arrivi, servizi, risorse, code e regole di dispatching. Questo consente di impostare con relativa rapidità un piano sperimentale DOE (Design of Experiments) per condurre confronti fattoriali rigorosi.

Quando invece la criticità operativa riguarda l'interazione a livello "micro" o nello scambio verticale (elevatori, o nelle complesse sincronizzazioni con navette), la letteratura mostra che vengono adottate piattaforme multi-metodo. Rientra in questo gruppo la piattaforma AnyLogic [4], per realizzare modelli ibridi (DES+ABM) di sistemi verticali: in questi modelli, la componente DES governa le code e la ca-

pacità, mentre l'ABM è delegata alla descrizione delle state-chart, delle missioni specifiche e interlock dei singoli agenti (shuttle e controller). L'architettura ibrida consente di analizzare approfonditamente come le scelte di dimensionamento (numero di elevatori, limiti delle code) impattino su metriche di sistema quali il throughput e il tempo di ciclo. Si nota inoltre che la stessa piattaforma viene impiegata per la costruzione di Digital Twin [9] per sistemi AS/RS, mantenendo coerenza tra logiche di stato (state chart) e variabili di controllo del modello. Questo approccio permette di diagnosticare in modo proattivo eventuali code strutturali e di procedere alla taratura delle priorità, sia prima dell'avviamento (pre-avvio) sia in fase di esercizio.

2.4.2 Ambiti applicativi e integrazioni avanzate

Partendo dagli ambiti applicativi la simulazione è lo strumento principale per confrontare le diverse strategie di picking e le logiche di rilascio o raggruppamento degli ordini. Permette di testare, usando dati reali, approcci diversi (dallo strict order picking fino al batch, zone e wave picking) e di misurarne l'impatto su tempi, distanze e lead time complessivi.

Nei magazzini manuali a rack multilivello, il DES si usa per testare le coppie "allocazione (storage) e percorso (routing)". Si mettono a confronto politiche (es. random, dedicata, class-based) con diverse strategie di percorso (transversal, return, combined) per capire come ridurre distanza e tempo di retrieval. La letteratura [5] evidenzia, tramite simulazioni su differenti configurazioni di magazzino, che la combinazione di class-based storage e combined routing risulta mediamente la più efficiente per ridurre il retrieval time, soprattutto alle basse densità di prelievo (5–30%). Per quanto riguarda la travel distance, il vantaggio del layout verticale emerge in modo più marcato solo oltre tali livelli di densità, indicando una correlazione positiva tra intensità di picking e beneficio del sistema multilivello.

La validazione delle regole non si ferma qui, si simulano, ad esempio, le priorità di servizio e i vincoli fisici di caricamento (stacking), per osservare l'impatto su

code e rientri. Gli studi [8] mostrano che definire un ordine di carico predeterminato aiuta a stabilizzare il flusso, senza però creare nuovi colli di bottiglia in altre aree o livelli. Infine, la simulazione è fondamentale per il dimensionamento delle risorse, che viene impostato come un vero esperimento. Si fissano diverse combinazioni di numero e turnazione di operatori e baie (packing o consolidamento) e si seleziona quella che rispetta le soglie richieste per throughput, WIP e lead time.

La capacità di scambio verticale è un fattore critico nei sistemi multi-livello. L'analisi, in questi contesti, deve quindi concentrarsi sul quanto questa capacità pesi effettivamente sul ciclo totale. Per trovare una risposta, gli studi confrontano VLM (moduli verticali) stand-alone rispetto a VLM integrati con buffer o shuttle, usando modelli ibridi DES+ABM. Il confronto VLM stand-alone vs VLM+buffer segue un DOE che varia numero/posizione elevatori, tempi di ciclo e limiti di coda, misurando tempo di ciclo e throughput [4]. A parità di layout, si fanno variare il numero e la posizione degli elevatori, i tempi di ciclo e i limiti delle code, per misurare l'effetto su tempo di ciclo e throughput. L'indicazione operativa è chiara: la capacità verticale va dimensionata prima di ottimizzare le altre leve (es. picking), perché è lì che si nasconde il rischio di code strutturali.

Discorsi simili valgono per i sistemi AS/RS (Maxi/mini-Shuttle): gli stessi modelli [9] permettono di “mettere a fuoco” dove si formano le attese (livelli, elevatori, stazioni) e di preparare regole di dispatching più efficaci perché basate sui colli osservati. Oltre alla gestione dei singoli sistemi automatici, un'altra criticità emerge quando in un magazzino operano dispositivi diversi (es. AGV, AMR, navette). In questi casi, una schedulazione non coordinata crea inevitabilmente attese incrociate. La simulazione, in questo caso, diventa il banco di prova per testare politiche congiunte e per l'ottimizzazione multi-obiettivo (es. tempo/energia) delle flotte, considerando la loro interazione con stazioni ed elevatori. I risultati pubblicati [10] mostrano che la co-schedulazione MADPSO (risolta con NSGA-III) migliora un indice aggregato tempo/energia di circa 52–75% rispetto alle regole tradizionali (in base allo scenario).

Proprio la complessità di questi modelli ibridi introduce la terza metodologia: i metamodelli. Questi non sono modelli di magazzino, ma modelli del modello di simulazione. Ad esempio, i metamodelli (spesso reti neurali LSTM), se addestrati sugli output di un modello DES/ibrido, possono predire molto rapidamente il makespan (con un'accuratezza misurata da MAE/MAPE). Possono anche agire da “filtro di rischio” [6], individuando combinazioni di parametri che potrebbero generare criticità (come i deadlock), le quali verranno poi verificate con simulazioni mirate. Le integrazioni avanzate affrontano la complessità decisionale e operativa nei sistemi magazzino, estendendo il ruolo della simulazione verso modelli adattivi e predittivi. Tra queste, un ruolo sempre più centrale è ricoperto dal Reinforcement Learning (RL). All'interno della letteratura su Intelligent Warehouse e automazione[1, 3], il RL è spesso utilizzato come un motore decisionale “intelligente”. Il suo scopo è assegnare dinamicamente le missioni (a operatori, AMR o AGV) e scegliere i percorsi o le risorse verticali (come gli elevatori) da utilizzare, soprattutto in condizioni di congestione. La politica di RL viene addestrata all'interno della simulazione.

Questo processo si basa sulla definizione di tre elementi:

- **stato** (che fotografa la situazione attuale, come la lunghezza delle code agli elevatori, l'occupazione delle stazioni, l'urgenza degli ordini),
- **set di azioni** (le scelte che l'agente può fare, come quale missione assegnare o che rotta prendere),
- **reward** (un punteggio che premia i comportamenti virtuosi, come l'alto throughput, e penalizza quelli negativi, come lunghe attese o spreco di energia).

Quando lo stato è discretizzabile, si impiega spesso il Q-learning tabellare, dove l'agente apprende iterativamente tramite una strategia di esplorazione ε -greedy. In presenza di spazi di stato ampi o continui, si ricorre invece al Deep Q-learning, che utilizza reti neurali per approssimare la funzione Q.

Studi recenti basati su Deep Q-learning applicato al picking dinamico confermano l'efficacia di tali politiche di apprendimento: in scenari con elevata frequenza di arrivi d'ordine, il modello addestrato ha mostrato una riduzione del tempo medio di completamento di circa 4,3 volte rispetto agli algoritmi di riferimento, con un tasso di ordini inevasi pari al 2% contro il 18% dei benchmark [11]. Tali risultati dimostrano come l'approccio di Reinforcement Learning possa migliorare sensibilmente le prestazioni di picking, specialmente in contesti ad alta intensità di domanda.

Sebbene lo studio sia limitato a un singolo blocco e a un solo agente, rappresenta la prima evidenza quantitativa della capacità del RL di migliorare autonomamente le prestazioni di picking, confermando la validità della simulazione come ambiente di addestramento e test. Gli studi poc'anzi citati mostrano risultati coerenti con tali obiettivi: le attese agli elevatori si riducono, il throughput si stabilizza anche nei picchi e il carico di lavoro risulta più bilanciato tra le aree, senza richiedere nuovo hardware. Tuttavia, il metodo presenta limiti noti: richiede un elevato numero di episodi di training, è sensibile a variazioni di layout o mix di domanda, e impone la gestione rigorosa di vincoli "hard" (sicurezza, capacità) durante la fase esplorativa [1, 3]. Questi limiti confermano quindi il ruolo fondamentale della simulazione come banco di prova. È l'ambiente in cui la politica RL viene addestrata e poi testata, confrontandola con gli stessi scenari usati per le regole deterministiche tradizionali. Solo se i KPI si dimostrano robusti e rimangono entro le soglie prefissate, si può procedere con l'implementazione in esercizio della rappresentazione tramite digital twin, la quale deve comunque prevedere un monitoraggio attento e una regola di "fallback" sicura. Nell'ottica del Warehouse 4.0, le stesse rassegne riportano anche l'uso del Machine Learning (ML) tradizionale per lo slotting dinamico e per le previsioni della domanda. I benefici attesi, simili a quelli del RL, riguardano la stabilità del throughput e la gestione delle code, pur con i medesimi vincoli legati alla robustezza e alla necessità di un ampio addestramento. Il Digital Twin viene utilizzato quando il modello deve fare il salto dall'analisi alla gestione operativa [9]. Questo riutiliz-

za lo stesso impianto logico della simulazione (state-chart, missioni, contatori di code/attese) ma si collega ai dati in tempo reale permettendo di fare what-if rapidi su priorità, limiti di coda e bilanciamenti, e di diagnosticare colli strutturali direttamente durante l'esercizio.

3 Metodologia

3.1 DES applicato ai magazzini multilivello

Per il seguente caso di studio si utilizza la simulazione ad eventi discreti (DES), ideale per modellare sistemi logistici complessi con flussi discontinui e risorse condivise. Questo approccio è cruciale nei magazzini multi-livello, dove le prestazioni dipendono direttamente dalle sequenze di prelievo e dai vincoli operativi. Nella simulazione DES il comportamento del sistema viene rappresentato come una serie di eventi. Tra gli eventi logistici più comuni si citano l'ingresso di un'unità di carico, l'avvio o il termine di un'attività di stoccaggio, l'assegnazione di un mezzo e la fine di un trasferimento. Questo approccio si adatta bene ai processi di magazzino, in cui le unità di carico percorrono sequenze note e le performance globali sono valutabili combinando le regole operative con la configurazione del layout [5].

Nei magazzini multi-livello, la complessità è dominata dai movimenti verticali e dalla condivisione dei sistemi di sollevamento. Ciò introduce vincoli di capacità e possibili attese che non sono facilmente rappresentabili tramite modelli statici. Al contrario, La DES è adatta a rappresentare processi sequenziali e competizione per risorse, e a misurare KPI come throughput e cycle time [4].

3.2 Ambiente di simulazione

L'implementazione del modello è avvenuta tramite AnyLogic, scelto perché consente di sviluppare sistemi ad eventi discreti mantenendo un forte legame tra logica, layout e risorse. Nei magazzini automatici, questo è cruciale perché l'approccio integra flussi e struttura, offrendo un realismo operativo assente nelle rappresentazioni teoriche o statiche [9]. Nei sistemi multi-livello a movimentazione verticale è indispensabile fondere la logica di processo con lo spazio fisico, dato che l'operatività dipende strettamente dai collegamenti tra i piani e dall'uso delle risorse condivise. In questi scenari è necessario simulare l'accesso ai collegamenti verticali e le regole di assegnazione delle risorse. Quando più unità cercano di

usare gli stessi punti di passaggio, si creano code e ritardi che rallentano l'intero sistema.

All'interno dell'ambiente AnyLogic, il modello è stato costruito integrando tre componenti principali:

- gli elementi di **Space Markup**,
- **Process Modeling Library (PML)**
- **Material Handling Library (MHL)**.

Lo **Space Markup** è stato utilizzato per modellare la struttura fisica, definendo i livelli e i vincoli spaziali del magazzino. Questo approccio fa sì che il layout sia una base logica utile per tracciare percorsi e connessioni [9].

L'uso della **Process Modeling Library (PML)** ha permesso di tradurre il funzionamento logistico in un diagramma di flusso, distinguendo ingresso, servizio, uscita e code. Ciò è utile per individuare le cause dei ritardi, rendendo le dinamiche osservate in simulazione facilmente riconducibili alle logiche di gestione implementate. La logica di processo non risolve da sola la complessità del picking: ciò che conta è l'effetto delle regole sul sistema, esso è influenzato da risorse finite e priorità. Affinché il modello sia affidabile, è necessario validare i fenomeni di congestione e l'uso delle risorse, stabilendo così un nesso causale diretto tra le strategie operative adottate e i risultati ottenuti [7].

L'impiego della **Material Handling Library (MHL)** ha permesso di modellare la movimentazione interna, definendo risorse e infrastrutture sul layout. L'obiettivo è stato quello di rappresentare esplicitamente i movimenti e i relativi vincoli, rendendo la dinamica dipendente dai percorsi e dalle risorse disponibili. In questo modo si conserva la distinzione tra la logica di flusso (il compito) e l'esecuzione fisica (il movimento), garantendo che le due componenti restino coerenti nel modello [9].

Nel contesto dei magazzini multi-livello, la modellazione della movimentazione

verticale assume un ruolo centrale, risultando ben più critica rispetto ai flussi orizzontali. I sistemi di collegamento tra i piani, come i lift, si concentrano infatti in pochi nodi specifici del layout che rischiano di trasformarsi in colli di bottiglia. Questi punti critici condizionano i tempi di attesa e la sincronizzazione dell'intero sistema per questo conviene modellarli esplicitamente (tempi di servizio e capacità), valutandone l'impatto su KPI e scenari alternativi (es. più lift) [4].

Dal punto di vista metodologico, l'aver costruito tale sistema consente di confrontare diverse politiche operative o configurazioni di risorse, modificando singoli parametri senza compromettere la stabilità dell'intero sistema. La costruzione del modello ha seguito i riferimenti metodologici presenti in letteratura per lo studio dei processi di picking [7]. Attraverso l'uso di scenari di controllo, si è verificato che le dinamiche rilevate, come code o attese, siano l'effetto diretto delle regole operative impostate. Questo approccio assicura che i dati generati siano la conseguenza diretta delle scelte progettuali inserite nel sistema.

3.3 Simulazione

La modellazione si articola su due livelli distinti: la **logica di processo** e la **componente spaziale**. La prima definisce le regole e le sequenze operative, mentre la seconda descrive il layout multi-livello e i relativi vincoli geometrici.

Questa separazione è finalizzata a una corretta interpretazione dei risultati: se la simulazione evidenzia ritardi o saturazioni, è infatti possibile distinguere se la causa sia di natura logica (es. strategie di allocazione) o fisica (es. distanze e tempi di percorrenza verticale). Questo approccio sfrutta l'architettura di AnyLogic, che consente di integrare i flussi di processo con la movimentazione fisica pur mantenendo distinti i due aspetti [9].

L'architettura del sistema si basa sugli Agent, l'unità fondamentale di AnyLogic definita come un componente autonomo dotato di parametri, variabili e logiche d'interazione proprie. Questo approccio permette di trattare l'**agent Item** e l'**agent AGV** come entità attive che operano all'interno del flusso logico: l'Item

rappresenta l'unità di carico nel percorso dall'ingresso all'uscita, mentre l'AGV costituisce la risorsa operativa incaricata della movimentazione.

Si è scelto di non introdurre un'entità separata per la gestione delle missioni (Job), preferendo coordinare le attività tramite l'interazione diretta tra i blocchi del processo e la flotta di agenti. Questa scelta riduce la presenza di stati intermedi poco controllabili e rende più diretto il legame tra domanda di prelievo e l'occupazione effettiva delle risorse, che è centrale quando si vogliono osservare fenomeni di attesa e saturazione in un sistema di picking con risorse limitate.

3.3.1 Logica di processo e gestione delle risorse

Il modello descrive il ciclo operativo come una sequenza di eventi: creazione dell'Item, stoccaggio, generazione della richiesta, picking con AGV e uscita dal sistema. Dal punto di vista tecnico, l'implementazione in AnyLogic si basa sull'uso congiunto della Process Modeling Library (PML) per la logica di flusso e della Material Handling Library (MHL) per gestire operativamente lo stoccaggio e le risorse di movimentazione come mostrato in Figura 1.

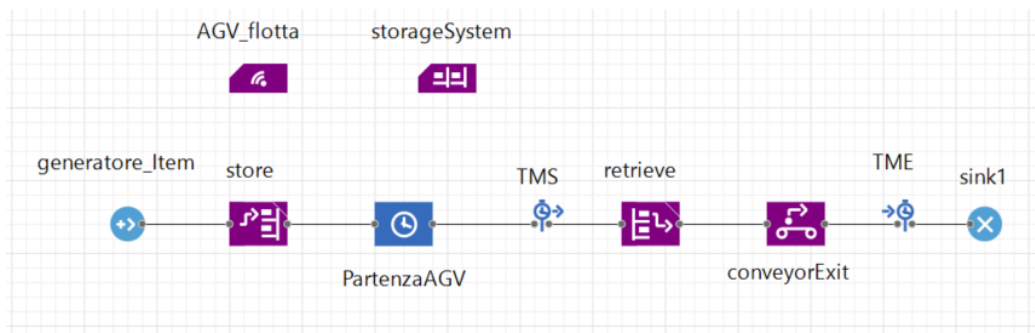


Figura 1: Schema della logica di processo (PML/MHL) adottata nel modello.

La generazione degli Item è affidata al blocco **Source** (PML). Gli Item vengono poi stoccati mediante il blocco **Store** (MHL), integrato con uno **StorageSystem**. L'uso di componenti dedicati consente di modellare lo stock come allocazione fisica e non come semplice coda di attesa.

Il sistema è dimensionato per circa 1000 item con assegnazione casuale delle lo-

cazioni; questa scelta assicura un dimensionamento realistico. Dopo la fase di stoccaggio è stato posizionato un blocco **Delay (PML)**. Lo scopo è separare temporalmente la fase di deposito dalla domanda di prelievo, impedendo che il modello attivi una missione di recupero immediatamente dopo l'ingresso dell'unità nello stock.

L'operazione di uscita è poi governata dal blocco **Retrieve (MHL)**, che preleva l'unità dallo *StorageSystem* e collega la richiesta operativa alla disponibilità effettiva della risorsa mobile. La movimentazione è gestita tramite una **Transporter Fleet (MHL)**, cioè una flotta finita di AGV. Questa scelta è fondamentale perché introduce un vincolo reale: le code e le attese non sono parametri fissati a priori, ma emergono spontaneamente quando le richieste superano i veicoli disponibili.

È un approccio coerente con la letteratura [7], che considera affidabili i modelli in grado di far nascere le congestioni direttamente dalle regole operative. Infine, in ogni percorso l'AGV trasporta un solo Item per viaggio. La figura 2, mostra l'azione di picking evidenziando il fatto che il picker prelevi dallo storage un solo Item alla volta.

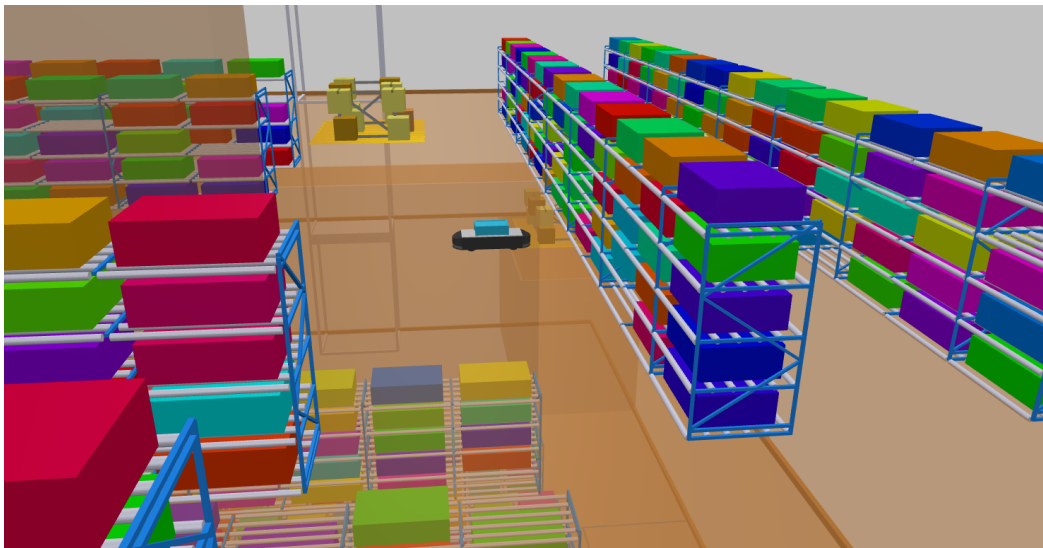


Figura 2: Picking AGV

Al termine della consegna, l'AGV non rimane in una posizione casuale. Al piano P0 sono state definite due postazioni definite tramite un **Rectangular**

Node chiamato *Stazione AGV*. Esse vengono mostrate in figura 3 e fungono da base operativa della flotta: la regola è che l'AGV rientri al parking e da lì riceva il compito successivo. Questa scelta rende più riproducibile il comportamento del sistema e stabilizza le condizioni iniziali tra una missione e l'altra, soprattutto quando si confrontano scenari con diversa numerosità di AGV.

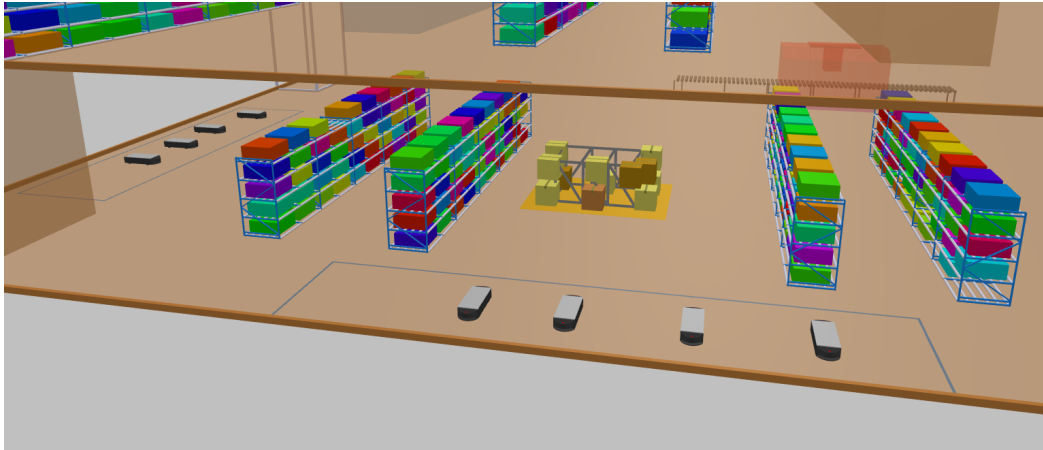


Figura 3: Stazione (parking) degli AGV al piano P0.

L'uscita dal sistema avviene, come mostrato in figura 4, tramite un Conveyor (MHL), nastro trasportato, nel quale l'AGV scarica l'Item per simulare la movimentazione fuori dallo scenario di studio.

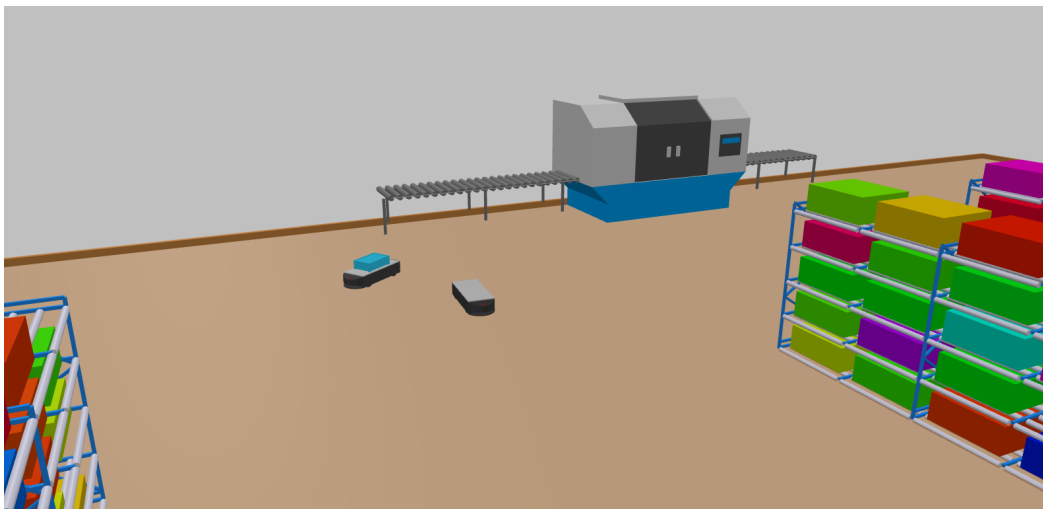


Figura 4: Scarico AGV dell'Item su Conveyor al Deposito Ordine (Piano 0) .

Questa scelta distingue nettamente la fase mobile da quella fissa, evidenziando il momento dello scambio. Inoltre, sono stati inseriti i blocchi TimeMeasureStart e TimeMeasureEnd; il loro utilizzo verrà gestito nella parte risultati.

3.3.2 Layout multi-livello, lift e regole di accesso

Il layout del magazzino è strutturato su quattro livelli (da P0 a P3), come si evince dalla figura 5 che rappresenta il magazzino in 3D. Gli AGV possono operare su tutti i piani per recuperare la merce, rendendo la dimensione verticale una parte attiva del processo e non solo un aspetto grafico.

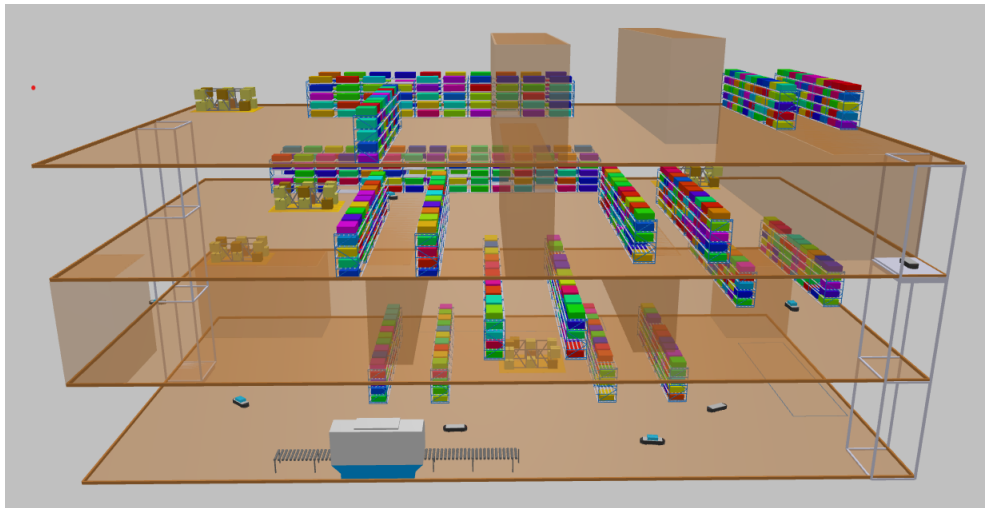
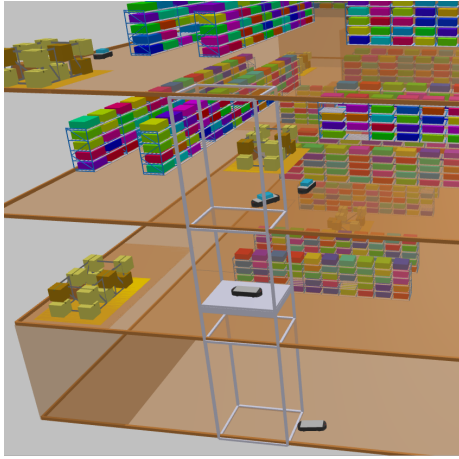


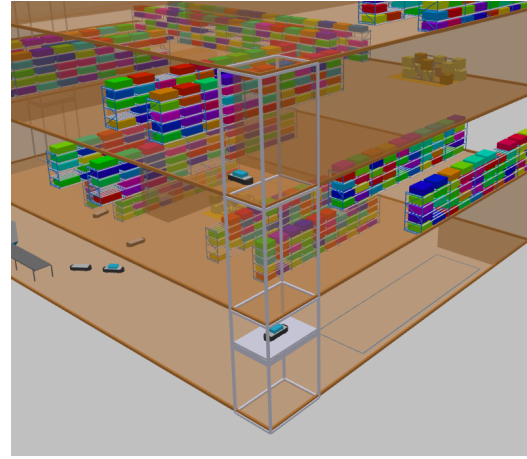
Figura 5: Struttura Magazzino Multi-livello

Per il cambio di livello sono stati inseriti due lift, entrambi in grado di servire tutti i piani. Questa ridondanza permette di distribuire il carico di lavoro verticale, evitando di creare a priori un unico collo di bottiglia. Come sottolineato in letteratura [4], nei sistemi multi-livello la gestione esplicita dei lift è fondamentale per ottenere attese e tempi di sincronizzazione realistici.

La gestione dei lift si basa su una disciplina FIFO. Come mostrato dalle due rappresentazioni di figura 6, l'AGV entra in coda e attende il proprio turno, a prescindere dal livello di partenza o arrivo. È una scelta di metodo, più che di ottimizzazione: si è preferito un meccanismo trasparente per poter leggere chiaramente le dinamiche di attesa.



a) Lift



b) Lift1

Figura 6: I due lift del sistema

Pertanto, eventuali congestioni sono imputabili solo alla saturazione delle risorse verticali e non a logiche di priorità difficili da tracciare. Invece di vincolare gli AGV a percorsi fissi (*path*), si è preferito adottare la navigazione in *free space*. Questa scelta permette ai veicoli di muoversi liberamente nel layout, simulando in modo più realistico gli ingombri e le manovre necessarie per evitare ostacoli. Di conseguenza, la gestione del traffico e delle code vicino ai lift risulta più accurata, poiché il modello tiene conto dello spazio fisico effettivamente occupato dai mezzi durante le attese. Inoltre, come si può osservare in figura 7 davanti a ogni lift è stata creata una zona di attesa (*holding zone*, creata tramite Rectangular Node).

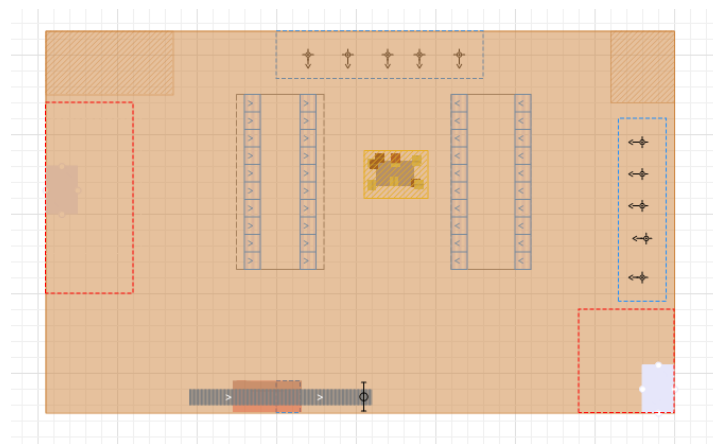


Figura 7: Rappresentazione 2D del piano P0

Questa area è utile a mettere in fila i veicoli in maniera ordinata, evitando che si blocchino o si sovrappongano mentre aspettano il proprio turno per cambiare piano. In questa sezione è stato descritto come è stato costruito il modello, definendone regole e vincoli. Con questa base, è possibile passare all'analisi dei risultati che verranno presentati e discussi nel prossimo paragrafo.

4 Risultati

Le simulazioni per l'analisi sono state eseguite su Anylogic e i dati sono stati raccolti tramite gli strumenti di analisi del software. Questo ha permesso di ottenere grafici e valori numerici direttamente dalle esecuzioni. L'analisi è basata sul confronto tra due politiche di picking.

Le politiche di assegnazione sono state impostate direttamente all'interno del blocco Retrieve di AnyLogic.

- **Nearest to agent:** Il sistema sceglie il mezzo libero più vicino al punto in cui serve il suo intervento.
- **Shortest path to pick up location :** individua il mezzo in grado di raggiungere il punto di prelievo percorrendo la distanza minore.

Definiscono quindi, il criterio con cui AnyLogic assegna un trasportatore (AGV) alla missione di prelievo. Per ogni politica vengono mantenuti invariati il layout, le risorse e la logica generale del processo, così che le differenze nei risultati dipendano principalmente dalla regola di picking adottata.

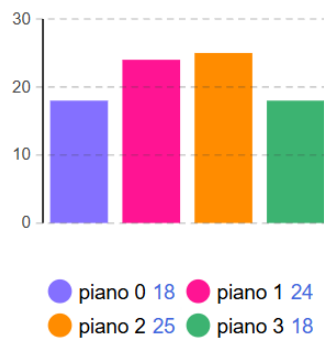


Figura 8: Numero picking per piano

Come riportato in figura, nel caso analizzato, il numero di picking risulta pari a:

- 18 per il piano 0,
- 24 per il piano 1,

- 25 per il piano 2
- 18 per il piano 3

Lo stesso andamento viene osservato sia con la politica **Nearest to agent** sia con **Shortest path to pickup location**, evidenziando che la distribuzione del picking sui livelli rimane invariata al variare della policy.

La distribuzione delle visite per piano è determinata principalmente dall'input del modello, in particolare dal processo di generazione degli ordini nel blocco Source e dalle logiche di distribuzione degli ordini sui vari piani. Poichè in entrambi gli scenari viene avviato lo stesso numero di item, la politica di dispatching nel blocco Retrieve interviene esclusivamente sulla selezione dell'AGV (senza influire sulla generazione dell'ordine o sulla sua collocazione), è coerente che la distribuzione del picking per livello rimanga invariata.

La valutazione si basa su specifici indicatori di prestazione (KPI). L'analisi di essi si concentra su tre aspetti:

- **Tempi:** per capire quanto velocemente il sistema completa le attività (es. attraversamento, attese).
- **Utilizzo delle risorse:** per vedere quanto sono impegnate le risorse principali e individuare possibili colli di bottiglia.
- **Produttività:** per misurare quanta attività viene completata nel periodo simulato (es. ordini, throughput).

Tale confronto serve ad evidenziare l'impatto delle due diverse politiche sui flussi verticali e sull'efficienza complessiva del sistema.

4.1 KPI

Considerando le premesse appena esposte si presentano ora gli indicatori di prestazione scelti:

- **Utilizzo operativo degli AGV:** definito come il tempo in cui ciascun veicolo risulta impegnato in una missione di movimentazione rispetto al tempo totale di simulazione. Nel modello, un AGV è considerato occupato durante gli spostamenti dalla posizione di prelievo al deposito e dal deposito alla postazione di picking.
- **Tempo di attraversamento del sistema:** è l'intervallo di tempo che intercorre tra l'arrivo di una richiesta di picking e il suo completamento. Questo indicatore riesce ad unire il tema dei trasporti con quello delle code per mettere in luce i difetti dei sistemi multilivello e spiegare dove nascono gli ingorghi quando ci si sposta tra i piani..
- **Numero di chiamate dell'ascensore per piano:** indicatore fondamentale per valutare i rallentamenti nelle risorse verticali. Nel modello, i lift sono configurati per gestire una sola chiamata alla volta; di conseguenza, il KPI non rappresenta il numero totale di AGV in attesa su un piano, ma la frequenza delle richieste di accesso ai lift. È utile per identificare quali piani esercitano maggiore pressione sul sistema.
- **Tasso di utilizzo dell'ascensore:** definito come il rapporto tra il tempo di effettivo impiego dell'ascensore e il tempo totale di simulazione. Questo KPI è particolarmente rilevante nei sistemi multilivello, poiché il lift rappresenta una risorsa potenzialmente critica e il suo livello di saturazione è direttamente collegato alla formazione di colli di bottiglia.
- **Distribuzione delle operazioni di picking per piano:** intesa come numero di visite di picking effettuate su ciascun livello del magazzino. Questo indicatore non misura direttamente una prestazione, ma fornisce un quadro della distribuzione del carico di lavoro verticale, utile per interpretare i risultati relativi all'utilizzo degli AGV e dei lift.

4.2 Raccolta dati e definizione scenari di confronto

Nel presente paragrafo i risultati della simulazione vengono analizzati confrontando le due politiche applicate allo stesso sistema di magazzino multilivello, diviso per KPI.

4.2.1 Utilizzo operativo degli AGV

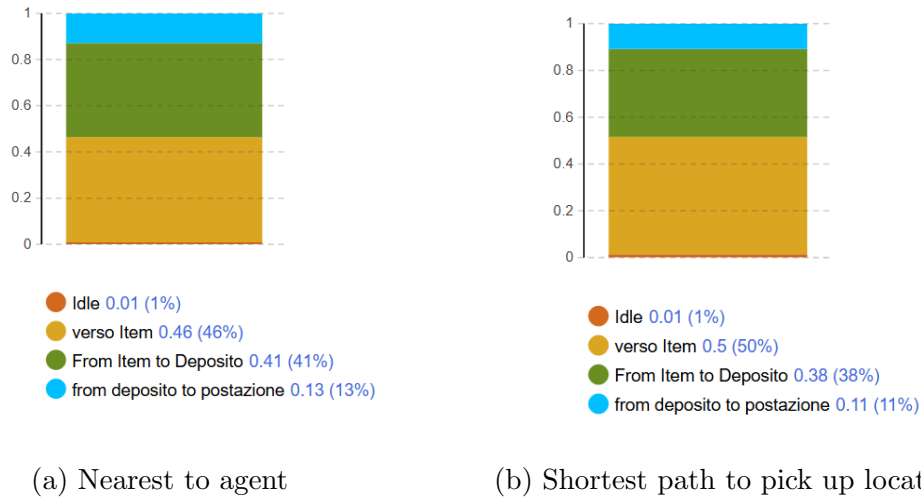


Figura 9: Utilizzo operativo AGV

La Figura 9, attraverso uno stack chart, mostra la suddivisione percentuale delle attività svolte dagli AGV durante il processo. Il tempo totale è scomposto nelle seguenti quattro fasi principali della missione:

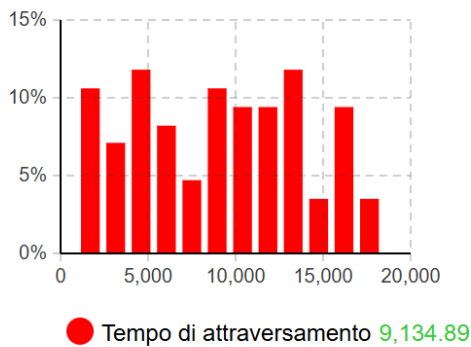
- **Idle:** È il tempo in cui l'AGV è fermo e disponibile, ma non ha ancora ricevuto alcuna missione dal sistema centrale.
- **verso item:** È il tempo che l'AGV impiega per spostarsi dalla sua posizione di partenza fino al punto esatto di prelievo.
- **from item to deposito:** L'AGV ha caricato l'articolo e lo sta trasportando dal punto di prelievo fino alla zona di scarico.
- **from deposito to postazione:** l'AGV si muove verso la postazione di partenza in attesa della prossima chiamata.

L'asse delle ordinate esprime queste grandezze come frazione del tempo totale (0–100%).

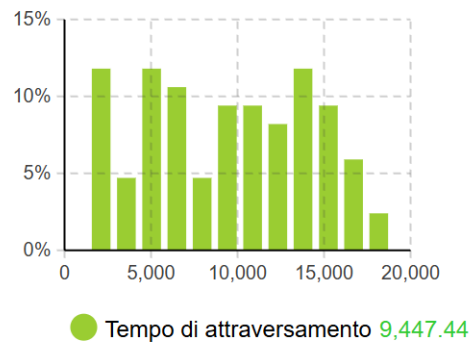
Analizzando la politica **Nearest to agent**, il tempo si suddivide in: **Idle 1%**, **verso item 46%**, **from item to deposito 41%** e ritorno alla **postazione 13%**. La configurazione cambia con la **Shortest path to pickup location**, dove la fase **verso item** sale al **50%** (+4 punti percentuali), mentre diminuiscono le quote di trasporto al **deposito 38%**,(-3 punti percentuali) e di **riposizionamento 11%** (-2 punti percentuali). Si osserva che la **Shortest path** ridistribuisce il lavoro, aumentando il tempo per avvicinarsi al prelievo e riducendo quello dedicato al trasporto dell'item.

Tali differenze sono coerenti con la dinamica del modello, dato che le politiche di dispatching agiscono direttamente sulla fase di assegnazione nel blocco Retrieve. Nel contesto della navigazione free space, la logica Nearest to agent seleziona l'AGV geometricamente più vicino, ottenendo l'effetto atteso di minimizzare il tempo di avvicinamento (verso item). In questo scenario la Shortest path to pickup location valuta la distanza teorica e dimostra che preferire il percorso più corto non garantisce un arrivo più rapido ma allunga la fase di avvicinamento.

4.2.2 Tempo di attraversamento



(a) Nearest to agent



(b) Shortest path to pick up location

Figura 10: Distribuzione del tempo di attraversamento

Tramite gli istogrammi in figura si osservano le distribuzioni del tempo di attraversamento fino al deposito ordine. Questa metrica misura l'intero intervallo dall'attivazione della missione di picking allo scarico dell'ordine. Nel grafico, l'asse orizzontale esprime la durata in secondi, mentre l'asse verticale mostra la frequenza relativa (in percentuale).

Il tempo di attraversamento passa da **9.135 s** (152,2 min) nella politica **Nearest to agent** a **9.447 s** (157,5 min) nella **Shortest path**. Si registra quindi un incremento di circa 5,2 minuti (+313 s) nel secondo scenario. Le prestazioni non dipendono solo dalla distanza percorsa. A incidere sono soprattutto i problemi di sincronizzazione e i tempi morti, dovute alla saturazione dei veicoli e delle risorse condivise.

Poiché il KPI misura il tempo dall'avvio dell'ordine fino al deposito, il tempo di attraversamento contiene sia la fase di assegnazione e avvicinamento dell'AGV al punto di prelievo, sia le successive fasi operative necessarie a completare il deposito. La politica di dispatching del blocco Retrieve influenza direttamente questa sequenza, perché determina quale AGV viene selezionato per servire l'ordine e quindi modifica tempi di avvicinamento. Dai dati raccolti si nota che lo scenario **Shortest path to pick up location** richiede più tempo rispetto al **Nearest to agent** e questo prova che basarsi solo sul tragitto stimato verso il prelievo non garantisce una riduzione della durata totale dell'ordine

4.2.3 Tasso di utilizzazione degli agv

In figura 11 viene rappresentato il tasso di utilizzo dei due ascensori presenti nel modello, espresso su scala 0–1 (0 = ascensore sempre libero, 1 = ascensore sempre occupato). I due dispositivi sono identificati come **Lift** (collocato a sinistra dell'area deposito) e **Lift1** (collocato a destra) come mostrato nelle figure 5 e 6. Il tasso di utilizzo dei lift è un indicatore diretto della pressione sulle movimentazioni verticali questo perché i valori più alti indicano che la risorsa è occupata per una frazione maggiore del tempo e quindi ha maggiore probabilità di diventare un vincolo per il sistema multilivello.



Figura 11: Tasso di utilizzazione degli AGV

- Con la politica Nearest to agent, il tasso di utilizzo risulta pari a **0.22 per Lift** e **0.34 per Lift1**.
- Con la politica Shortest path to pickup location, il tasso di utilizzo risulta pari a **0.18 per Lift** e **0.41 per Lift1**.

In entrambi gli scenari il **Lift1** risulta più utilizzato del **Lift**. Il carico verticale risulta sbilanciato verso il lato destro del magazzino. Inoltre, passando da **Nearest to agent** a **Shortest path to pick up location**, si osserva una lieve diminuzione dell'utilizzo di **Lift** (da 0.22 a 0.20) e un aumento dell'utilizzo di **Lift1** (da 0.34 a 0.41). In pratica, la politica **Shortest path to pick up location** tende a concentrare ulteriormente l'impiego sulla risorsa verticale già più sollecitata. Nel paragrafo successivo, l'analisi delle chiamate degli AGV ai lift viene utilizzata per spiegare questo sbilanciamento in termini di domanda di servizio.

4.2.4 Congestione verticale

I grafici mostrano l'andamento temporale delle richieste di servizio rivolte agli ascensori. È importante notare che, nella logica del modello, ogni piano può attivare al massimo una chiamata per volta. Di conseguenza, l'asse verticale quantifica il numero di piani attivi contemporaneamente nella richiesta (con un

picco teorico pari al numero totale dei livelli serviti), fornendo così una fotografia istantanea della congestione del sistema.

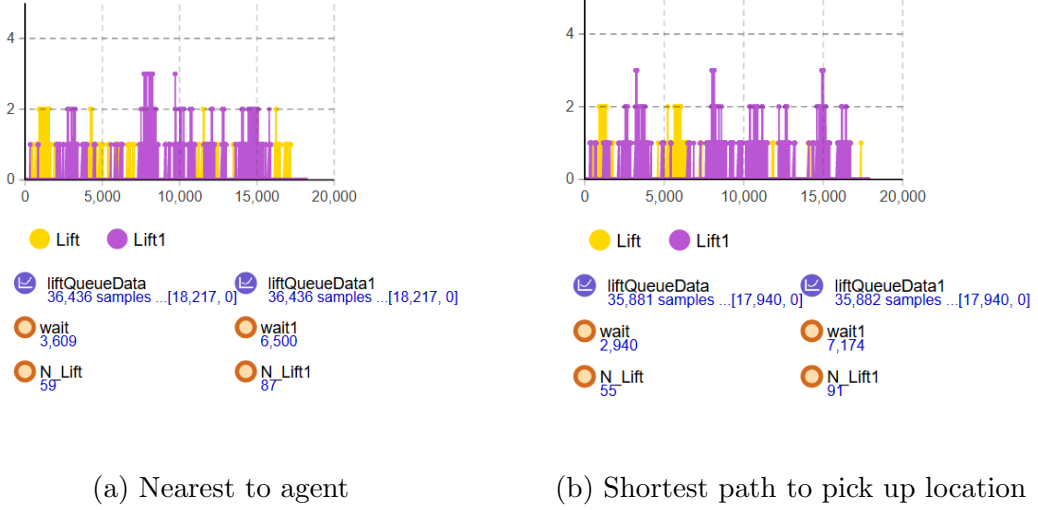


Figura 12: Numero di richieste per piano

La misura viene ricavata monitorando periodicamente la lunghezza della coda. I valori rilevati sono archiviati in **due dataset distinti** (uno per ciascun ascensore), permettendo di tracciare l'andamento temporale del carico su ogni risorsa.

In parallelo, il funzionamento di ciascun elevatore viene monitorato attraverso due variabili specifiche:

- **Wait e Wait1:** (rispettivamente riferiti a lift e lif1) tempo totale di attesa cumulato degli AGV associato a quel lift. Di conseguenza corrisponde al “costo cumulato” della congestione (quanto tempo, in totale, gli AGV rimangono bloccati);
- **N_Lift e N_Lift1:** (rispettivamente riferiti a lift e lif1) quante volte il lift viene effettivamente utilizzato durante la simulazione.

Sul time plot, in entrambi gli scenari la coda non è costante: si osserva un comportamento “a impulsi”, con tratti a coda nulla alternati a picchi. Questo è tipico di una risorsa verticale che lavora a lotti. Quando arrivano più AGV in una fine-

stra temporale ravvicinata, la coda cresce, poi si scarica quando il lift recupera capacità. In entrambe le politiche, la coda di **Lift1** presenta picchi più evidenti e più frequenti rispetto a **Lift**: visivamente **Lift1** arriva a **3 AGV in attesa** , mentre **Lift** si mantiene spesso entro picchi di 2 chiamate. Questo è un primo indizio che **Lift1** è la risorsa verticalmente più sollecitata.

Tabella 1: Scenario Shortest path to pick up location

Ascensore	Attesa totale cumulata [s]	N. utilizzi	Attesa media per utilizzo [s/uso]
Lift	2 940	55	≈ 53.5
Lift1	7 174	91	≈ 78.8
Totale / Media	10 114	146	≈ 69.3

I dati della tabella indicano che il **Lift1** rappresenta il collo di bottiglia principale nello scenario Shortest path. Il confronto tra i due ascensori mostra non solo un utilizzo più intensivo della risorsa (91 chiamate contro 55), ma anche un peggioramento dei tempi di risposta unitari. Passando dai valori assoluti a quelli relativi, l’attesa media per singola attivazione sale dai 53.5 s del Lift ai 78.8 s del Lift1, dimostrando come quest’ultimo sia soggetto a fenomeni di congestione più alti per ogni servizio erogato.

Tabella 2: Nearest to agent

Ascensore	Attesa totale cumulata [s]	Volume di traffico (n. utilizzi)	Attesa media per utilizzo [s/uso]
Lift	3 609	59	≈ 61.2
Lift1	6 500	87	≈ 74.7
Totale	10 109	146	≈ 69.2

Con la logica Nearest to agent, il carico si sposta parzialmente sul primo ascensore. Il **Lift** gestisce 4 chiamate in più, aumentando l'attesa a 3 609 s (+669 s), mentre il **Lift1** ne gestisce 4 in meno, scendendo a 6 500 s (-674 s). Queste variazioni si compensano quasi del tutto, dato che il tempo totale di sistema (10 109 s) rimane praticamente identico a quello della Shortest path (10 114 s). In sostanza, la policy non elimina la congestione ma la ridistribuisce tra i due ascensori. Questo è confermato anche dall'attesa media per utilizzo, quella del Lift peggiora leggermente (da ≈ 53.5 a ≈ 61.2 s), mentre quella del **Lift1** migliora (da ≈ 78.8 a ≈ 74.7 s), pur restando l'ascensore più sollecitato.

4.3 Analisi risultati

Di seguito la tabella 3, che mostra attraverso i KPI scelti, una comparazione tra i due algoritmi proposti:

Tabella 3: Confronto KPI tra politiche di assegnazione

KPI	Shortest path	Nearest to agent	Migliore	Commento
Tempo di attraversamento ordine	9 447.44 s	9 134.89 s	Nearest	lead time minore.
Attesa verticale totale	10 114 s	10 109 s	\approx no significativa	congestione complessiva è trascurabile
Attesa sul collo di bottiglia Lift1	7 174 s	6 500 s	Nearest	Riduce la pressione sulla risorsa più critica.
Attesa Lift	2 940 s	3 609 s	Shortest	Trade-off: la Nearest sposta parte del carico (e dell'attesa) sul Lift.
Concentrazione dell'attesa	2.44	1.80	Nearest	Carico più bilanciato e meno concentrato sul Lift1.
Attesa media per utilizzo (Lift1)	\approx 78.8 s	\approx 74.7 s	Nearest	A parità di chiamate, usare Lift1 diventa mediamente più veloce.
Attesa media per utilizzo (Lift)	\approx 53.5 s	\approx 61.2 s	Shortest	Lift peggiora per migliorare il bilanciamento globale.

La tabella evidenzia che le due politiche generano la stessa quantità di conge-

stione verticale totale, ma la distribuiscono diversamente. In particolare, **Nearest to agent** risulta preferibile quando l'obiettivo principale è ridurre il lead time e soprattutto, alleggerire la risorsa verticale più critica **Lift1**. Di conseguenza il tempo di completamento ordine migliora in modo percepibile e la pressione sul collo di bottiglia si riduce, mentre il totale delle attese verticali rimane sostanzialmente invariato. Questo indica che la policy non elimina le attese ma tende a redistribuirle sul sistema. Allo stesso tempo, la tabella rende evidente un trade-off: il miglioramento su **Lift1** avviene a fronte di un peggioramento sull'altro ascensore **Lift**. In altre parole, la politica **Nearest to agent** sposta parte del carico verticale dal ramo più congestionato verso quello meno sollecitato, ottenendo un beneficio sul vincolo principale ma “pagando” un incremento di attesa su una risorsa secondaria.

Se invece il criterio decisionale fosse minimizzare l'attesa su Lift (indipendentemente dal collo di bottiglia), allora Shortest path to pick up location risulterebbe più adatta su quel singolo aspetto. Tuttavia, in un sistema multilivello dove la risorsa critica condiziona l'intero flusso, la lettura complessiva della tabella porta a concludere che **Nearest to agent** è la scelta più efficace per migliorare la prestazione globale senza aumentare la congestione totale, ma redistribuendola in modo più gestibile.

5 Conclusione

Questa tesi ha avuto come obiettivo la simulazione di un sistema logistico di magazzino multilivello; l'analisi si è concentrata in particolare sulle dinamiche di picking e sulle risorse condivise che ne determinano le prestazioni complessive. Il modello è stato sviluppato in AnyLogic e utilizzato per confrontare due politiche di dispatching (impostate nel blocco Retrieve) che definiscono il criterio con cui viene assegnato l'AGV alla missione di prelievo: Nearest to agent e Shortest path to pickup location. Il confronto è stato condotto a parità di layout, logica e risorse. I risultati della simulazione mostrano che l'effetto più visibile si manifesta già nella fase di avvicinamento dell'AGV al punto di picking. In navigazione free space, la logica Nearest to agent seleziona il veicolo geometricamente più vicino e ottiene l'effetto di ridurre i tempi di percorrenza verso il punto di prelievo. Al contrario si nota che la logica Shortest path to pick up location allunga la fase di avvicinamento e dimostra che calcolare la distanza minima non garantisce di fatto un recupero più rapido. Questo spiega perché, guardando il tempo di attraversamento, la politica Nearest risulta complessivamente più efficiente e riduce il lead time dell'ordine in modo percepibile. Sul fronte multilivello, la componente verticale rimane centrale: i KPI sui lift indicano che la congestione verticale non viene eliminata dal cambio di policy, ma viene redistribuita. In altri termini, pur mantenendo costante il tempo complessivo di attesa verticale, il sistema ne modifica la distribuzione, spostando i punti di congestione all'interno del flusso. È un aspetto cruciale perché la risorsa verticale più stressata comanda l'intero flusso. Ridurre il carico su questo collo di bottiglia migliora le prestazioni generali, pure se la somma dei ritardi resta quasi uguale. In questo specifico modello, la tabella di sintesi evidenzia infatti che Nearest to agent è preferibile quando l'obiettivo principale è migliorare la prestazione globale (lead time) e alleggerire la risorsa verticale dominante Lift1, accettando però un trade-off: parte del carico si sposta sull'altro ascensore Lift. Nel complesso questo porta quindi a considerare Nearest come scelta più efficace “di sistema”, perché rende la congestione più gestibile e meno concentrata sul vincolo principale. Infine, la distribuzione delle operazioni

di picking sui piani risulta invariata tra le due politiche, coerentemente con il fatto che l'input del modello (generazione ordini nel Source e loro assegnazione ai livelli) è mantenuto identico e la policy di dispatching interviene solo sulla selezione dell'AGV, non sulla collocazione dell'ordine. Questo aspetto è utile perché rafforza l'interpretazione dei risultati verticali poichè la differenza tra scenari non nasce dal fatto che ci siano più chiamate in un determinato piano, ma dal modo in cui le missioni vengono servite dalle risorse di movimentazione. Il contributo della tesi si divide in due parti. In primo luogo, si osserva che un'impostazione specifica, quale la regola di assegnazione nel Retrieve, influenzi direttamente il lead time e il carico sulle risorse condivise. In secondo luogo, chiarisce che nei sistemi multilivello non basta osservare il tempo di attraversamento; bisogna analizzare la congestione verticale e i colli di bottiglia poiché sono questi elementi a determinare se il flusso rimane stabile. I dati raccolti sono legati al layout creato e le informazioni sui lift servono a evidenziare i ritardi e il carico di lavoro piuttosto che la produttività reale del sistema. Occorrerebbe ampliare la ricerca simulando nuovi scenari con una flotta variabile e diverse logiche di assegnazione ordine. Così facendo sarà possibile individuare una nuova regola che possa comprendere i motivi della sua efficacia in contesti specifici.

Riferimenti bibliografici

- [1] A. A. Tubis e J. Rohman. “Intelligent Warehouse in Industry 4.0—Systematic Literature Review”. In: *Sensors* 23 (2023), p. 4105. DOI: 10.3390/s23084105.
- [2] M. Harfeldt-Berg e J. Olhager. “The customer order decoupling point in empirical operations and supply chain management research: a systematic literature review and framework”. In: *International Journal of Production Research* 62.17 (2024), pp. 6380–6399. DOI: 10.1080/00207543.2024.2314164.
- [3] K. Ellithy et al. “AGV and Industry 4.0 in warehouses: a comprehensive analysis of existing literature and an innovative framework for flexible automation”. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 134 (2024), pp. 15–38. DOI: 10.1007/s00170-024-14127-0.
- [4] N. Tavira Jr. et al. “Multi-Method Modeling and Simulation of a Vertical Lift Module with an Integrated Buffer System Using AnyLogic”. In: *Proc. Winter Simulation Conf.* 2024.
- [5] F. T. S. Chan e H. K. Chan. “Improving the productivity of order picking of a manual-pick and multi-level rack distribution warehouse through the implementation of class-based storage”. In: *Expert Systems with Applications* 38 (2011), pp. 2686–2700. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.08.058.
- [6] A. Ferrari e C. G. Corlu. “Metamodel-based Order Picking for Automated Storage and Retrieval Systems”. In: *Proc. Winter Simulation Conf.* 2024.
- [7] S. Alfano et al. “Optimizing the order picking process via simulation: a case study”. In: *Proc. 21st Int. Conf. on Modelling and Applied Simulation (MAS), 19th I3M Multiconference*. Paper 017. 2022. DOI: 10.46354/i3m.2022.mas.017.
- [8] B. M. Guerrero Moreno. “Simulation study on a warehouse picking process taking into account a predetermined order of further goods loading”. In: *Journal of Translogistics* 8 (2022). DOI: 10.37190/JoT2022_02.

- [9] D. De Luca. “Costruzione e Ottimizzazione di un modello di simulazione di un magazzino automatico in ottica Digital Twin”. Tesi di laurea mag. Torino, Italy: Politecnico di Torino, 2022.
- [10] J. Li et al. “Multi-AGV-Driven Pallet-Picking Scheduling Optimization (MADPSO): A Method for Flexible Multi-Level Picking Systems”. In: *Applied Sciences* 14 (2024), p. 1618. DOI: 10.3390/app14041618.
- [11] M. Mahmoudinazlou et al. *Deep Reinforcement Learning for Dynamic Order Picking in Warehouse Operations*. arXiv:2408.01656. 2024.