

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Gestionale percorso Logistico**

Tesi di Laurea Magistrale

**Autonomous Vehicle Storage and
Retrieval Systems (AVS/RS):
Modellizzazione di un sistema ad
Eventi Discreti**



Relatore:

Prof. Franco Lombardi

Co-Relatori:

Ing. Gianluca D'Antonio

Ing. Giulia Bruno

Candidato:

Marco Bellone

A.A. 2017-2018

*«Nel mezzo delle difficoltà
nascono le opportunità»*

Albert Einstein

Sommario

1. Introduzione	6
1.1. La logistica di magazzino	6
1.2. Autonomous Vehicle Storage and Retrieval System	9
1.3. Stato dell'arte	11
1.4. Il sistema ESMARTSHUTTLE	14
1.4.1. Shuttle	15
1.4.2. Satellite.....	16
1.5. Obiettivo del lavoro	17
2. La simulazione ad eventi discreti	18
2.1. Introduzione	18
2.2. Schema dello studio di un problema basato sulla simulazione	21
2.3. Software di Simulazione	22
2.3.1. Simio [21] - SIMulation Intelligent Object	23
2.3.2. Arena®	23
2.3.3. Flexsim®	24
2.4. Modello di Simulazione	34
2.4.1. Assunzioni.....	34
2.4.2. Creazione automatizzata del modello	36
2.4.3. Process Flow	39
3. Caso studio	44
3.1. Analisi dell'ambiente Food & Beverage	44
3.2. Caso Studio	45
3.3. Il processo produttivo	46
3.3.1. Confezionamento	46
3.3.2. Invio al magazzino	46
3.3.3. Gestione del magazzino.....	47
3.4. Analisi descrittiva dei dati aziendali	47
3.4.1. Numero di colli	47
3.4.2. Tempi di formazione dei lotti	48
3.4.3. Composizione dei pallet	51

3.5.	Analisi dei dati di vendita aziendali	52
3.6.	Analisi dei requisiti.....	53
3.7.	Piano sperimentale	54
3.7.1.	Throughput degli ingressi nel magazzino	56
3.7.2.	Throughput delle uscite dal magazzino.....	59
3.7.3.	Cicle Time dello storage	63
3.7.4.	Cicle Time del retrieval.....	66
3.7.5.	Cicle Time di attesa in fase di stoccaggio	67
3.7.6.	Cicle time di attesa nel caso di retrieval.....	70
3.7.7.	Livello di servizio.....	74
4.	Conclusioni.....	83
4.1.	Sviluppi futuri	84
5.	Bibliografia	86

Abstract

La crescente competizione globale nel campo della logistica richiede alle aziende una maggiore flessibilità nel settore dell'automazione dei magazzini in modo da poter offrire al cliente un livello di servizio sempre maggiore.

Da qui nasce l'esigenza di modelli matematici e di simulazione che permettano di utilizzare tali sistemi in modo ottimale e di fronteggiare in modo efficace gli scenari di impiego che possono via via presentarsi. Allo stato attuale, sono ben consolidati i metodi con cui valutare le performance dei sistemi tradizionali, ad esempio i trasloelevatori. Viceversa, vi sono ancora delle lacune per i sistemi sviluppati più recentemente, come gli Autonomous Vehicle Storage and Retrieval Systems che possono essere riorganizzati in modo duttile e generare elevati livelli di throughput per soddisfare le diverse necessità in modo veloce ed efficiente.

In questo lavoro verrà sviluppata e discussa una metodologia basata sulla modellizzazione ad eventi discreti per la performance di un AVS/RS. In particolare, è stato implementato un meta-modello di simulazione capace di creare autonomamente, a partire da un insieme di input dell'utente, conformazioni della scaffalatura e flotte di veicoli di diversa dimensione e valutarne la prestazione attraverso il tempo ciclo e il throughput complessivo del sistema. Il modello è stato sviluppato tramite il software di simulazione Flexsim.

La metodologia sviluppata è stata applicata al caso studio di un produttore italiano di pasta. Questo utente richiede un AVS/RS ad elevata flessibilità poiché il livello della produzione è fortemente variabile (possono essere attive da una a cinque linee contemporaneamente) mentre le consegne verso i clienti sono tipicamente polarizzate in poche ore della giornata. Il metodo adottato si è rivelato particolarmente efficace: la creazione automatizzata del modello permette di ridurre drasticamente i tempi di implementazione e i possibili errori dell'utente. È così possibile ottenere un modello in pochi secondi e, quindi, confrontare in breve tempo la performance di diversi sistemi o la reazione di uno stesso sistema di fronte a diversi scenari di utilizzo.

1. Introduzione

1.1. La logistica di magazzino

La globalizzazione [1] è quel fenomeno mondiale che si caratterizza per l'aumento degli investimenti e degli scambi internazionali che avvengono su scala mondiale e che, cresciuti più velocemente dell'economia mondiale, hanno portato a rendere tra loro dipendenti tutte le economie delle varie nazioni. Grazie a questo fenomeno è stato possibile avvicinare i vari paesi anche sotto altri aspetti, come quello culturale, del pensiero e dei costumi.

In ambito produttivo, i principali fattori che ne hanno abilitato la globalizzazione dei mercati sono la riduzione dei tempi e dei costi della produzione e spedizione delle merci su lunghe tratte, la riduzione delle imposte sulle dogane e l'evoluzione tecnologica dei mezzi di scambio informativi.

Con l'aumento degli scambi internazionali, ogni azienda ha dovuto focalizzarsi maggiormente sulla qualità del prodotto o servizio offerto cercando di migliorarne le tecnologie e aumentarne le possibilità di personalizzazione per ogni tipo di cliente. Per competere su uno scenario globale, oltre a questo, è necessario che un'azienda possa ridurre tempi e costi di produzione e spedizione.

Considerata quindi la necessità delle imprese di essere sempre più concorrenziali per poter rimanere in questo nuovo ambiente, è nata l'esigenza di una ristrutturazione profonda del settore logistico [2].

Questo può essere valutato in termini di *disponibilità* del prodotto, ovvero cercare di avere sempre scorte sufficienti in magazzino; *tempestività* della consegna al cliente; *affidabilità* del servizio, generalmente correlata alla regolarità del tempo di consegna, l'integrità dei prodotti spediti e la conformità qualitativa e quantitativa della consegna rispetto all'ordine emesso; *flessibilità* del servizio, cioè la capacità di adattamento del sistema logistico alle mutevoli richieste da parte del cliente.

L'ambiente logistico si compone di infrastrutture, flussi informativi e procedurali e componenti organizzative che vanno ottimizzati rispetto le scelte strategiche aziendali considerando fattori di:

- *innovazione* ovvero cercando di garantire al cliente consegne discontinue in piccoli lotti;

- *differenziazione del servizio* cioè promettendo consegne rapide, affidabili e tolleranti verso le richieste del cliente;
- *leadership di costo* ovvero minimizzando i costi, sempre mantenendo un livello di servizio accettabile.

Fulcro della gestione dei prodotti è la scelta delle infrastrutture che riguardano il numero di livelli di una rete distributiva, il numero e la posizione di unità produttive, magazzini, depositi e centri di distribuzione ed il layout da assegnare ad ognuno di essi.

I magazzini sono il fulcro della filiera logistica e devono permettere una rapida risposta alla domanda di beni e servizi proveniente dai clienti.

Uno dei principali problemi da affrontare è la difficoltà che si incontra nello stoccare la merce in magazzino e nell'individuare quale sia la conformazione ottimale dello stesso perché ad una richiesta di un prodotto segua una repentina risposta del sistema: nell'ambito del *material handling* si è andata a ricercare il layout migliore e, di conseguenza, un sistema di convogliamento che permetta un collegamento tra ambiente interno ed esterno cioè tra i dispositivi nelle scaffalature (trasloelevatori automatici o carrelli manuali) e gli operatori o i macchinari esterni a quell'ambito.

Il livello di servizio al cliente è un valore cardine da considerare per il miglioramento dell'efficienza aziendale. Nel rivolgere l'attenzione alla probabilità di incorrere in stock out, non è possibile esimersi dal far riferimento ai magazzini, che, all'interno della filiera logistica, diventano così centrali nella ricerca dell'ottimizzazione globale. La loro corretta gestione e l'uso di un sistema di movimentazione di merci adatto può essere determinante nel soddisfare il cliente.

Il sistema di *material handling* più consolidato al momento è quello che adotta i trasloelevatori per portare l'unità di carico al punto di stoccaggio o di ritiro [figura 1.1].

È composto da un telaio mobile che si muove lungo una colonna verticale che trasla lungo il corridoio tra due scaffalature; questa colonna è ancorata ad una trave inferiore che si muove su due ruote portanti e da ruote poste nella parte superiore che mantengono il trasloelevatore verticale o lo fanno scorrere su dei binari.



Figura 1.1 - Trasloelevatore

L'uso di questo mezzo è di particolare rilievo nell'Automated Storage and Retrieval System (AS/RS). Questo sistema si basa sull'utilizzo di trasloelevatori che si muovono lungo i corridoi del magazzino. Per la movimentazione in magazzino, questi veicoli possono muoversi in modo longitudinale, lungo il corridoio, verticale e trasversale per stoccare o recuperare un'unità di carico (Udc).

I vantaggi nell'uso di questa struttura, rispetto i sistemi di movimentazioni precedenti basati sull'uso di carrelli elevatori o nastri trasportatori, sono il miglioramento del controllo e monitoraggio del magazzino, una maggiore flessibilità nell'implementazione del sistema, mezzi più facilmente sostituibili grazie alla riduzione dei tempi di fermo macchina, riduzione del costo del lavoro e aumento dell'utilizzo dello spazio. Di contro però bisogna considerare la richiesta un considerevole investimento iniziale, un numero di scorta non molto elevato e la presenza di tecnici esperti.

Rispetto ai sistemi precedenti, l'AS/RS ha prestazioni migliori ma due grossi difetti:

- Può trasportare un solo collo alla volta, cosa che limita la flessibilità del sistema anche se il movimento avviene in direzione diagonale per minimizzare il tempo ciclo;
- Lo scaffale servito può avere profondità massima di uno o due Udc. Dato ciò, ogni due Udc bisogna prevedere un corridoio di passaggio per l'AS/RS.

Per superare questi problemi sono stati sviluppati nuovi sistemi, come [3]:

- CBAS/RS (*Crane-Based Automated Storage / Retrieval System*);

- AVS/RS (*Autonomous Vehicle System / Retrieval System*).

Il primo è costituito da nastri trasportatori, scaffalature e gru per permettere lo stoccaggio ed il recupero dei pallet.

Le gru sono completamente automatizzate e possono viaggiare tra i corridoi presenti tra le scaffalature per immagazzinare e recuperare i prodotti richiesti. Possono movimentare Udc di diversa dimensione ed è proprio il tipo di prodotto da movimentare che influisce sul design della gru stessa.

Il secondo tipo di struttura deriva dai progressi avuti nel campo dell'AV (*Autonomous Vehicle*), in particolar modo nella progettazione hardware che ha aiutato i produttori di sistemi di movimentazione a sostituire le gru con questa nuova tecnologia, in primis in magazzini europei.

Le sue caratteristiche principali sono quelle di facilitare l'accesso a tutte le posizioni di stoccaggio nella scaffalatura (in inglese chiamata rack) e soprattutto la possibilità di cambiare rapidamente il numero di veicoli presenti nel sistema. I movimenti verticali di questi mezzi sono facilitati dalla presenza di ascensori posizionati all'estremità della scaffalatura mentre gli spostamenti orizzontali sono effettuati tramite shuttle.

La maggior difficoltà inerente a questa nuova tecnologia è il dimensionamento del sistema e delle attrezzature necessarie. Per poter sfruttare a fondo le peculiarità di un sistema, è necessario condurre un'analisi approfondita inerente tutti gli scenari che possano verificarsi e le possibili strategie per affrontarle, tramite l'utilizzo sia modelli matematici che di simulazioni numeriche.

1.2. Autonomous Vehicle Storage and Retrieval System

Considerando la struttura del magazzino in cui sono presenti una o più scaffalature, il sistema di movimentazione AVS/RS, studiato in questo lavoro, si compone di:

- un ascensore che si occupa dei movimenti verticali;
- uno o più shuttle che si muovono orizzontalmente lungo i corridoi delle scaffalature;
- uno o più satelliti che, incaricati del deposito/prelievo dell'Udc e posizionati sopra lo shuttle, possono muoversi dentro la scaffalatura per raggiungere la posizione appropriata.

Tutto il sistema è formato da questi veicoli autonomi integrati tra loro [4]: lo shuttle viene portato al livello prefissato tramite l'ascensore che si occupa degli spostamenti sull'asse verticale; il satellite, caricato sullo shuttle, viene portato da questo ultimo all'ingresso del canale. Una volta arrivato, viene scaricato dallo shuttle ed entra nel canale per svolgere l'operazione di stoccaggio o ripresa dell'item.

La struttura di questo sistema viene definita *tier-to-tier* ovvero i veicoli non sono vincolati a lavorare esclusivamente su un livello, ma hanno la possibilità di eseguire operazioni su tutti i piani, dove necessario. A questa organizzazione si contrappone quella denominata *tier-captive* in cui i mezzi non possono cambiare livello.

Nel sistema ci sono dei punti di prelievo, denominati *baie*, in cui l'Udc è posizionata per facilitarne il caricamento da parte del satellite e poter essere portato nella scaffalatura o, al contrario, sono locazioni in cui l'item viene lasciato dopo essere stato preso dal rack.

In figura 1.2 è rappresentato il sistema nella sua interezza: si può intendere il magazzino come un parallelepipedo in cui ai bordi lavorano uno o più ascensori che viaggiano tra i livelli del o dei rack presenti. Nei vari corridoio di questi ultimi troviamo i veicoli che posizionano o riprendono gli item.

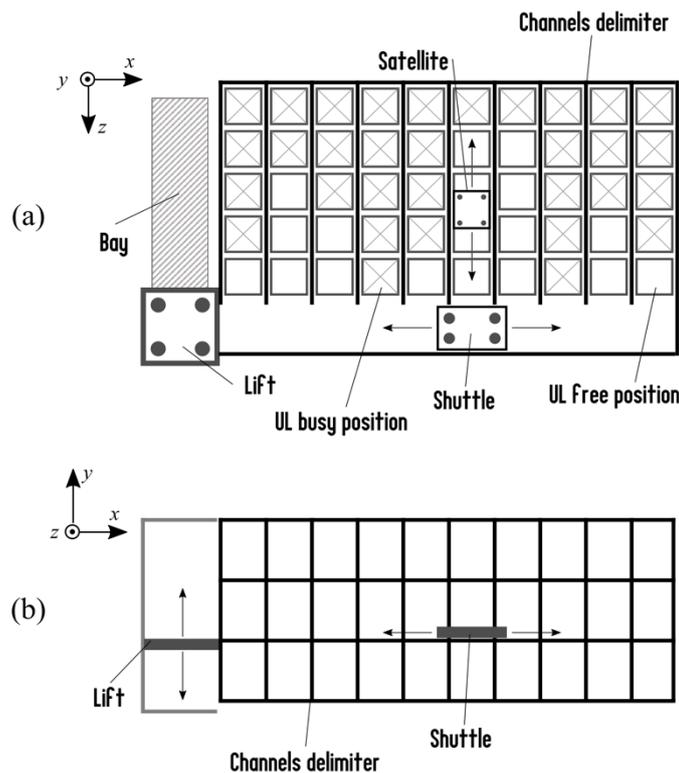


Figura 1.2 - Sistema AVS/RS. Immagine tratta da [15]

1.3. Stato dell'arte

Vari studi sono stati portati avanti per poter valutare in maniera più efficiente possibile le performance degli AVS/RS. La maggior parte degli approcci usati si basa su modelli analitici i cui risultati sono validati successivamente da una o più simulazioni fatte tramite software appositi.

In questo capitolo verranno riassunte brevemente le principali e più recenti pubblicazioni scientifiche relative al problema della valutazione delle performance dei suddetti sistemi.

Uno delle prime analisi è stata condotta da Malmborg nel 2002 [5] in cui l'autore suggerisce alcuni strumenti che possano supportare la scelta della più adeguata tecnologia e delle decisioni inerenti all'attuabilità delle performance dei sistemi AVS/RS.

Partendo da questo focus, propone di utilizzare, ad esempio, il tempo ciclo delle operazioni di stoccaggio e recupero, utilizzo dei veicoli ed il volume di produzione, nel modo più efficiente possibile considerando le dimensioni del magazzino e di tutto ciò che lo compone: le scaffalature ed i veicoli.

Nel 2007 Kuo et al. [6] hanno evidenziato che le decisioni più importanti riguardanti l'implementazione di una nuova tecnologia girano intorno ai costi che questa potrebbe apportare all'impresa e alle difficoltà inerenti la sua introduzione.

Data la loro crescente diffusione, l'introduzione dei sistemi ULS/RS (Unit Load Storage and Retrieval System – sistemi di stoccaggio e recupero delle unità), la sua introduzione nella filiera avrebbe portato ad un risparmio economico su tutta la linea. Per dimostrare questo, affianco alle misure di performance consuete utilizzate in queste analisi (tempo di attesa dell'operazione ed utilizzo del veicolo), sono state considerate due assunzioni:

- stoccaggio degli item in maniera casuale;
- regole del tempo di sosta POSC (Point Of Service Completion – punto di completamento del servizio).

Ekren et al. [7] nel 2010, tramite simulazione computerizzata basata su un magazzino presente in suolo francese, hanno cercato di identificare i fattori influenzanti le performance del sistema. Per fare ciò hanno inizialmente deciso il numero ottimale di ascensori e veicoli in uno scenario standard. I dati ricavati sono stati applicati a varie situazioni che mirano a descrivere o spiegare eventuali variazioni nel sistema in condizioni ipotizzate.

Questo procedimento prende il nome di DOE (Design Of Experiment) e nel suo sviluppo devono essere contemplati alcuni fattori:

- regole di schedulazione;
- politica del punto di sosta (*dwell point*);
- punti di input ed output.

Inoltre, hanno tenuto conto del tempo medio di utilizzo di ascensori e veicoli e del tempo ciclo medio necessario per lo stoccaggio ed il recupero degli item.

Ekren ed Heragu [8] hanno poi comparato le prestazioni attese da un AVS/RS con il tradizionale CBAS/RS (Crane-Based Automated Storage and Retrieval System) basato sull'utilizzo di gru nel magazzino.

Le due conformazioni sono state simulate usando un programma di simulazione (ARENA 12.0) e considerando 5 misure di performance:

- flow time medio;
- utilizzo dei mezzi di stoccaggio e ripresa;
- tempo medio di attesa in coda dei veicoli;
- numero medio di operazioni in attesa dei mezzi;
- costi.

I risultati hanno portato ad affermare che, considerando le prestazioni dei primi tre punti, l'AVS/RS risulta essere il più efficiente. Viceversa, considerando nella valutazione anche il costo del sistema, il design migliore per il magazzino tende ad essere il CBAS/RS.

In un articolo seguente [9], gli stessi autori hanno iniziato a studiare l'AVS/RS cercandone la configurazione migliore e, quindi, il numero ottimo di veicoli ed ascensori che possano assicurare il rendimento massimo del magazzino.

Le misure di performance considerate sono il tempo ciclo medio delle operazioni di stoccaggio e ripresa dei pallet e l'utilizzo medio dei mezzi e degli ascensori.

Heragu et al. [10] hanno invece modellizzato delle variabili del sistema AVS/RS e dell'AS/RS sfruttando l'ipotesi di un network a coda aperta (OQN – Open Queuing Network) ed utilizzando uno strumento chiamato MPA (Manufacturing Performance system Analyser - sistema di analisi delle performance della produzione): questa metodologia ha

permesso di valutare velocemente ed in modo migliore le varie configurazioni dei due sistemi.

Leheren et al. [3], hanno proposto un metodo per il calcolo delle performance di un SBS/RS, con particolare attenzione per il throughput complessivo del sistema.

Nel 2015 Zou et al. [11] hanno proposto un metodo per valutare un sistema in cui ciascuno shuttle lavora solo a livelli predefiniti (ovvero, in configurazione tier-captive). Il metodo è in grado di considerare anche la possibilità di movimentazioni svolte in parallelo. Ciascuna operazione di stoccaggio può essere scomposta in un movimento orizzontale eseguito dallo shuttle e uno verticale svolto da un ascensore. Questo tipo di analisi utilizza una politica di coda detta “fork-join” ovvero a biforcazione. I risultati hanno mostrato che questo tipo di modellizzazione è valida per magazzini con scaffalature con meno di 10 livelli e lunghezza dei canali non eccessiva. In caso contrario tutti i vantaggi nell’uso di questa ipotesi vengono a decadere e le performance del modello decrescono.

Nel 2017 D’Antonio et al. [4] hanno sviluppato modelli analitici che prevedevano una variante del classico sistema di AVS/RS: un veicolo (satellite) in più che viaggia sullo shuttle e si occupa del posizionamento del pallet all’interno del canale della scaffalatura.

I modelli considerano:

- differenti layout della scaffalatura;
- criteri reali per lo stoccaggio e presa degli item;
- la capacità dello shuttle e del satellite di fare operazioni differenti simultaneamente;
- valutare media e deviazione standard del tempo ciclo.

Nello stesso anno, Lerher [12], ha portato avanti uno studio basato sulla progettazione di un sistema SBS/RS che potesse ottimizzare tempo ciclo medio dei veicoli, throughput e capienza del magazzino.

La conclusione di queste analisi ha portato ad affermare che sono necessari altri fattori caratterizzanti il magazzino ed i veicoli che influenzano in maniera determinante i risultati dello studio. Tra questi abbiamo:

- numero di livelli della/e scaffalatura/e presenti nell’ambiente;
- numero di canali su ogni livello;
- velocità ed accelerazione dei veicoli;

Parallelamente a questi studi, Bruno et al. [13] hanno spostato il focus della loro analisi dalla definizione di misure di performance, come tempo ciclo o utilizzo dei veicoli, alla determinazione di un modello matematico, validato tramite simulazione, che consideri il consumo di energia nel sistema.

Akpunar et al. [14] considerando il lavoro precedente, hanno dato un'impronta più ecologica al loro studio e sono andati a valutare il modo migliore con cui massimizzare l'utilizzo dei veicoli presenti in magazzino, minimizzando il consumo di energia.

Anno	Autore/i	Metodo di Modellizzazione	Misure di Performance in Output
2002	Malmborg	Equazione di Stato	Tempo Ciclo, Utilizzo dei Veicoli, Throughput
2007	Kuo et al.	Modello Analitico	Tempo ciclo, Costi
2010	Ekren et al.	Modello di Simulazione	Tempo Ciclo ed Utilizzo dei Veicoli
2010	Ekren ed Heragu	Modello di Simulazione	Utilizzo dei Veicoli, Costi
2011	Ekren ed Heragu	Modello di Simulazione	Tempo Ciclo ed Utilizzo dei Veicoli
2011	Heragu et al.	Modello Analitico	Tempo Ciclo, Design del Sistema
2015	Lehrer et al.	Modello di Simulazione	Tempo Ciclo, Throughput
2015	Zou et al.	Modello Analitico	Tempo Ciclo, Utilizzo dei Veicoli
2017	D'Antonio et al.	Modello Analitico	Tempo Ciclo
2017	Lerher	Modello di Simulazione	Tempo Ciclo, Throughput

Tabella 1.1 - Stato dell'arte delle ricerche nel campo dell'AVS/RS

1.4. Il sistema *ESMARTSHUTTLE*

La società italiana Eurofork [15] si occupa della produzione di sistemi di movimentazione automatici. La divisione di questa azienda che interessa il questo lavoro è quella denominata ESMARTSHUTTLE, specializzata nella produzione e progettazione di sistemi richiedenti l'utilizzo di shuttle per magazzini automatici.

I depositi implementati con questo tipo di sistema possono lavorare 24/24 h e 7 giorni alla settimana grazie ad un sistema di gestione centralizzato cui è possibile accedere da remoto.

1.4.1. Shuttle

Lo shuttle (figura 1.3) è il veicolo introdotto da Eurofork che trasporta il satellite ed, eventualmente, l'Udc lungo la direzione x .



Figura 1.3 - Eshuttle

L'alimentazione è fornita da una batteria a litio da 48V in grado di fornire un rendimento continuo nel tempo, grazie anche alle stazioni di ricarica posizionate nelle vicinanze. Uno dei punti forti di questa tecnologia è il non dover fermare il veicolo o sostituire la batteria quando scarica. In più, è creato da componenti caratterizzate da un alto livello di affidabilità e facilmente reperibili sul mercato mondiale; questo rende molto più facile la manutenzione.

Le caratteristiche principali dello shuttle sono elencate in tabella 1.2 [16].

Tipo di motore e Potenza	48V Brushless – 2 kW
Alimentazione elettrica	Batteria a Litio 100, Ah
Numero di ruote per unità	8
Dimensioni massime del pallet	1000 x 1200 mm
Carico massimo	1500 Kg
Velocità massima con il carico	150 m/min
Accelerazione massima con il carico	1.0 m/s ²
Tipo e potenza del motore del trasportatore a catena	48V Brushless – 0.8 kW
Peso	750 Kg
Temperatura di lavoro	da -24 °C fino a 60 °C

Tabella 1.2 - Caratteristiche Shuttle

1.4.2. *Satellite*

Il satellite (figura 1.4) è il veicolo incaricato della presa e rilascio delle unità di carico nella scaffalatura, in caso di stoccaggio, o in una baia esterna, nel caso di ripresa di un item.



Figura 1.4 - Esatellite

La sua movimentazione avviene sull'asse z, proprio per la caratteristica di dover entrare nei canali dei rack per posizionare o prendere le unità di carico.

Le sue caratteristiche sono elencate in tabella 1.3 [16].

Tipo di motore e Potenza	48V Brushless – 2 kW
Alimentazione elettrica	Batteria a Litio, 40 Ah
Numero di ruote per unità	8
Dimensioni massime del pallet	1000 x 1200 mm
Carico massimo	1500 Kg
Velocità massima con il carico	75 m/min
Accelerazione massima con il carico	1.0 m/s ²
Tipo e potenza del motore del trasportatore a catena	48V Brushless – 1 kW
Peso	250 Kg
Temperatura di lavoro	da -24 °C fino a 60 °C

Tabella 1.3 - Caratteristiche Satellite

L'azienda ha constatato che ci sono numerosi vantaggi derivanti dall'uso di questa tecnologia:

- aumento delle prestazioni;
- incremento dell'indice di sfruttamento volumetrico del magazzino;
- risparmio energetico;
- attività di manutenzione ridotte;

- è adatto ad edifici irregolari, bassi o con impedimenti strutturali.

1.5. Obiettivo del lavoro

Le capacità di nuovo questo sistema di *material handling* hanno suscitato notevole interesse tanto nell'ambito accademico quanto in quello industriale, data anche la scarsità di soluzioni implementate per lo sviluppo dell'AVS/RS. Ciò è dovuto alla difficoltà nell'utilizzo di vari software di simulazione ad eventi discreti nei quali non sono ancora state inserite librerie capaci di modellizzare questo tipo di sistema. Viceversa, vi è più facilità nel creare simulazioni di sistemi AS/RS.

Il focus di questo lavoro è lo sviluppo di una metodologia di analisi di un AVS/RS basata sulla modellizzazione ad eventi discreti di un AVS/RS. Il metodo sviluppato consente di automatizzare la creazione di un modello a partire da un insieme di input dell'utente: topologia del magazzino, caratteristiche dell'AVS/RS e dimensione della flotta, statistiche sulle richieste di deposito e di prelievo di UdC. Il modello è stato testato in diversi scenari operativi sul caso studio di un pastificio italiano che ha deciso di adottare un AVS/RS in quanto soggetto ad una produzione giornaliera molto variabile, a differenza delle consegne che sono concentrate in poche ore nella giornata.

Il sistema di immagazzinamento considerato in questa tesi è stato sviluppato dalla Eurofork, un'azienda basata nell'area torinese, il cui sistema prende il nome di ESMARTSHUTTLE.

2. La simulazione ad eventi discreti

2.1. Introduzione

La competizione nel settore della logistica ha portato le aziende a focalizzarsi sempre di più sulla riduzione dei costi, degli sprechi di materiali e di tempo ed un conseguente aumento del livello di servizio da poter offrire al cliente.

I manager hanno scoperto essere necessario analizzare ogni ambito della propria impresa, a partire dai magazzini, luogo in cui le merci entrano, rimangono stoccate finché non sono richieste dal cliente e dove possono subire i maggiori danni: da quello fisico al furto, fino all'obsolescenza nel caso si tratti di strumenti informatici.

Un *sistema* [17] è definito come un insieme di componenti tra loro interdipendenti che lavorano insieme per raggiungere un obiettivo prefissato.

Le moderne tecnologie ICT hanno permesso lo sviluppo di software di simulazione con cui è possibile ricostruire in modo virtuale le caratteristiche significative di un sistema aziendale per osservarne il comportamento in diversi scenari: con *simulazione* [18] si fa riferimento alla riproduzione del comportamento di un sistema tramite relazioni logico-matematiche durante un certo arco temporale. Il suo uso è duplice: può essere utilizzata per approcciarsi a situazioni concrete oppure usata in presenza di un modello che riproduce la realtà mediante uso del computer. Questo strumento permette quindi di passare dalla formalizzazione di modelli matematici alla loro modellizzazione, utile per validare le previsioni fatte sul funzionamento dell'ambiente in fase di progettazione.

La simulazione non può essere eseguita se prima non viene creato un modello del sistema.

Un *modello* [19] logico o matematico è composto da approssimazioni ed assunzioni, quantitative e strutturali, che riguardano l'agire del sistema nel tempo

Un *modello di simulazione* è una rappresentazione astratta del sistema in cui vengono inclusi solamente gli aspetti più rilevanti dell'ambiente.

I modelli si caratterizzano per la presenza di diversi elementi:

- *Variabili di Stato*: il sistema è descritto in ogni istante di tempo da variabili che vengono così definite. Un esempio è il numero di utenti presenti in una coda in un determinato momento.

- *Eventi*: situazione che influisce sul valore di una delle variabili di stato. Questi possono essere raggruppati in eventi esterni al sistema (esogeni) od interni al sistema (endogeni).
- *Entità ed Attributi*: i primi sono singoli elementi del sistema che devono essere definiti. Nel caso questo fluisca nel modello si parla di entità dinamica, in caso opposto è un'entità statica. Gli attributi caratterizzano un dato valore dell'entità. Attraverso l'utilizzo di questi valori, si possono raggruppare le entità dello stesso tipo in classi.
- *Risorse*: sono elementi del sistema che forniscono un servizio alle entità.
- *Attività e Ritardi*: La prima è un'azione di cui si conosce la durata prima della sua realizzazione. Questo valore può derivare da una costante, dai dati in input o da una variabile aleatoria generata tramite distribuzione di probabilità.

Un ritardo è invece un'azione di durata non definita che dipende dalle condizioni del sistema.

Il primo grande ostacolo nella formalizzazione di un modello è quello di realizzarlo nel modo più semplice possibile: ideare modelli molto grandi in cui è richiesta una considerevole mole di dati implica una maggiore complessità ed una difficoltà di analisi più elevata.

È necessario anche che il modello abbia un livello di astrazione tale da includere tutti quegli elementi indispensabili al raggiungimento dello scopo dello studio.

Barnett [20] ha definito quattro dimensioni con cui poter classificare i modelli:

- *Sistema di interesse*: determina il tipo di informazione che viene generato dalla simulazione. Considerando, ad esempio, una supply chain è necessario definire lo spostamento che subiscono i materiali tra i vari nodi del network per capire le dinamiche relative alla movimentazione dell'inventario, l'effetto bullwhip, la variabilità su tutta la catena.
Può capitare che il sistema cui ci si riferisce sia un processo di gestione comprensivo di tutti i dati ad esso inerenti.
- *Visibilità*: internamente un modello può essere "trasparente" o "black-box". Nel secondo caso si tratta di situazioni di cui non si riesce bene a rappresentare le relazioni interne: da questo punto di vista sono molto facili da usare, hanno una alta efficienza ma non forniscono alcuna risposta al comportamento osservato in output. Al contrario, i modelli meccanici e "trasparenti" descrivono i processi reali usando leggi naturali e principi scientifici.

- *Probabilità*: il modello può essere
 1. Probabilistico. Un insieme di input singolo di input si traduce in vari possibili output e le uscite mostrano delle variazioni descrivibili con le statistiche;
 2. Deterministico. Lo stesso insieme di input risulta nell'output e le uscite sono casualmente determinate dagli eventi precedenti.
- *Dinamica*: che può definire un modello stazionario nel quale gli output non mostrano variazioni nel tempo e nello spazio, oppure una situazione dinamica in cui succede la situazione opposta.

Un *sistema dinamico ad eventi discreti* si basa sul susseguirsi degli eventi ovvero è un sistema i cui cambiamenti di stato avvengono esclusivamente nel caso in cui si verificano eventi tra di loro non sincronizzati. Questa situazione può essere un'azione specifica causata da un particolare comando oppure un avvenimento spontaneo dovuto alla natura del sistema. Per definire il tempo in cui accade una azione, si usa il *simulation clock* che è un meccanismo di avanzamento del tempo del quale fornisce il valore corrente. Per definirne l'incremento si può considerare o l'avanzamento del tempo all'evento successivo o l'avanzamento del tempo ad intervalli prefissati.

Un approccio di questo tipo risulta efficiente da un punto di vista computazionale ed ha il vantaggio di essere intuitivo e, di conseguenza, facile da capire e studiare.

L'idea di base di un sistema ad eventi discreti è semplice:

- un simulatore crea graficamente o tramite codice la sequenza di attività che le entità devono seguire;
- vengono forniti i dati in input ed in base al tempo delle attività gli eventi sono ordinati in una coda;
- la simulazione fa iniziare ogni evento. Questo esce dalla coda e, seguendo un percorso prefissato, deve eseguire tutte le operazioni predefinite.

La possibilità di costruire graficamente il modello di simulazione ha fatto sì che il suo uso sia notevolmente aumentato negli anni.

La rappresentazione grafica può essere suddivisa in:

- Diagrammi a Blocchi che definiscono le equazioni e la sequenza di calcoli a cui è soggetto il sistema di interesse;

- Diagrammi di Stato che rappresentano gli eventi e le transazioni che avvengono tra di essi che si susseguono nel sistema analizzato. Questo approccio è il più usato nella simulazione ad eventi discreti.

2.2. Schema dello studio di un problema basato sulla simulazione

In questo paragrafo verrà definito uno breve schema che possa fungere da descrizione di tutte le fasi caratterizzanti lo studio di un sistema mediante simulazione:

- *Analisi del Problema*

In questa prima fase è importante capire quale sia il problema del sistema per poter definire lo scopo ultimo dello studio, identificarne le componenti di maggior rilievo e le misure di prestazione più importanti.

- *Formulazione del Modello di Simulazione*

Considerando che si tratta di modelli stocastici, è necessario definire le distribuzioni di probabilità delle quantità di interesse. Questo passaggio serve a creare vari scenari rappresentativi del funzionamento del sistema in modo del tutto casuale.

La creazione del modello in un sistema ad eventi discreti è un processo particolarmente complesso che si articola in più fasi:

1. Definizione delle variabili di stato;
2. Individuazione dei valori che queste variabili possono assumere,
3. Identificazione di tutte quelle occorrenze che possono modificare lo stato del sistema;
4. Rappresentazione di una misura del tempo simulato (simulation clock) che definisca lo scorrimento del tempo simulato;
5. Realizzazione di un metodo che generi una successione casuale di eventi;
6. Individuazione delle variazioni di stato degli eventi generate dagli eventi.

- *Analisi del Modello di Simulazione*

Questa fase è importante per verificare che il modello sia concettualmente corretto e che abbia un livello di accuratezza tale da simulare nel modo più realistico possibile l'ambiente considerato.

- *Scelta del Software e Costruzione del Programma*

Per fare ciò è possibile utilizzare vari applicativi:

1. Linguaggi di programmazione *general purpose* (Fortran, Pascal, C, C++) che hanno i vantaggi di essere personalizzabili, flessibili e versatili ma che hanno tempi di codifica abbastanza lunghi.
2. Linguaggi di simulazione (GPSS, Simscript, Slam) che sono caratterizzati da costrutti specifici per sistemi particolari ma che richiedono una conoscenza specifica del linguaggio e tempi di debugging molto lunghi.
3. Simulatori (Flexsim, Arena, Simio) particolarmente usati per la facilità di utilizzo, l'assenza di programmazione e i rapidi tempi di implementazione che però peccano di personalizzazione ed hanno una portata limitata.

La simulazione è quindi lo strumento più utile per poter analizzare il sistema in tutte le sue sfaccettature e comprendere le problematiche che vi sono nascoste.

Simulare attraverso un modello ha anche altri vantaggi:

- riutilizzare il modello creato ad altri ambienti simili;
- acquisire una conoscenza approfondita del sistema tramite lo studio precedente alla creazione;
- un modello di simulazione è alquanto semplice da usare e non richiede assunzioni semplificative;
- a volte usare questo strumento è l'unica via applicabile.

Ciò non esclude le difficoltà che si possono incontrare nell'usare un approccio di questo tipo, considerando che:

- realizzare e validare un simulatore è costoso in termini di denaro e tempo;
- ottenere risultati significativi da un punto di vista statistico può richiedere lunghe e numerose simulazioni e, in alcuni casi, la presenza di un personale esperto;
- i modelli analitici, contrariamente, permettono di analizzare in modo esatto il comportamento del sistema.

2.3. Software di Simulazione

In questo paragrafo andiamo ad analizzare alcuni software di simulazione.

Come già descritto, i programmi di simulazione sono di aiuto, da un punto di vista anche visivo, per analizzare il comportamento del sistema considerato.

2.3.1. *Simio [21] - SIMulation Intelligent Object*

È un software di simulazione prodotto dalla SIMIO LCC che rappresenta un passaggio dalla riproduzione “process oriented” a quella “object oriented” e dispone di un’interfaccia grafica che permette l’avvio del modello di simulazione.

Gli oggetti sono stoccati in librerie e facilmente utilizzabili. Ognuno di essi può essere animato attraverso l’uso della grafica 3D per osservare i cambiamenti del suo stato.

Una delle caratteristiche principali di Simio [22] è l’utilizzo di una struttura stratificata a tre livelli, differenziata in definizione dell’oggetto, grado dell’oggetto e realizzazione dell’oggetto. La descrizione dell’entità ne determina un preciso comportamento e deve essere condivisa da tutti e tre i livelli. L’istanza dell’oggetto definisce il livello dello stesso all’interno della definizione di un oggetto “padre”; delinea i valori delle proprietà caratterizzanti l’oggetto e anche questi dati devono essere condivisi con tutta la struttura.

La metodologia più semplice per creare gli oggetti in questo ambiente di simulazione è quella di delineare processi logici che modifichino il loro stato in risposta al succedersi di eventi.

Ogni elemento può fare da base per la creazione di uno più complesso e di qui deriva la caratteristica di Simio di costruzione di oggetti che si fonda sul principio di ereditarietà. In pratica si parte dalla definizione di un elemento con date peculiarità che vengono man mano modificate ed ampliate perché l’entità in questione sia il più simile possibile a quella reale.

In Simio sono presenti sei classi base di oggetti che sono il punto di partenza per la creazione di oggetti intelligenti nella definizione del modello di simulazione. Gli elementi acquisiscono informazioni e modellano il loro comportamento considerando la raccolta di dati basata sugli eventi.

La convenienza ed efficacia nell’utilizzo di questo simulatore deriva dal riuscire a far partire gli eventi in modo automatico per tutte le classi di oggetti, ciò insieme alle fasi del processo che modificano lo stato degli oggetti.

2.3.2. *Arena®*

È un software distribuito dalla Rockwell Automation [23] e permette di creare modelli tramite un diagramma di flusso in cui sono utilizzati blocchi di forma diversa che identificano funzioni diverse.

Arena utilizza un proprio linguaggio incorporato chiamato SIMAN (Simulation Modeling Analysis): grazie a questo non è necessario scrivere le righe di codice perchè l'intero processo di creazione del modello di simulazione è grafico, visivo ed integrato.

In questo simulatore è possibile adoperare due tipi di moduli:

- Moduli Flow-Chart che sono disposti su una finestra che permetta la visualizzazione del diagramma di flusso e sono tra loro collegati dinamicamente;
- Moduli Data che descrivono il sistema in modo statico.

L'ambiente di simulazione permette di descrivere le dinamiche del sistema considerato mediante la disposizione in ordine dei blocchi in modo opportuno. Ogni "parte" del modello deve essere opportunamente dichiarato usando la libreria apposita in modo che alla fine della simulazione si possano analizzare i report statistici richiesti.

Tramite la sapiente disposizione di queste entità è possibile condurre un'analisi che permetta di:

- Conoscere ed analizzare tutti i processi aziendali allo stato attuale (*as-is*);
- Individuare i colli di bottiglia, quantificare i costi dei processi e ridurre il tempo ciclo;
- Includere tutte le attività, risorse, regole di business, logiche decisionali e costi;
- Schedulare ed allocare le risorse in maniera ottima;
- Effettuare una serie di analisi del tipo *what-if* che consenta una valutazione delle possibili alternative nella condizione *to-be*;
- Realizzare sostanziali miglioramenti delle performance.

2.3.3. *Flexsim*®

Flexsim [24] è un software di simulazione sviluppato dalla FlexSim Software Products, Inc. che si prefigge l'obiettivo di creare un ambiente di programmazione in grado di riprodurre un qualsiasi processo od ambiente produttivo ed analizzarne tutti gli aspetti di gestione. In questo modo è possibile analizzare il sistema nel modo più semplice e si riesce ad individuarne eventuali punti nevralgici.

L'ambiente di simulazione Flexsim permette una facile modellizzazione, una visione grafica 3D ed una personalizzazione degli oggetti elevata, di impostare il percorso e le attività che le varie entità devono seguire ed eseguire, di creare un'interfaccia che rende possibile

l'inserimento da input delle variabili caratterizzanti gli oggetti e che visualizzi tutte le statistiche in output richieste dall'utente.

La sua praticità ed efficienza lo ha portato ad essere utilizzato in numerosi campi: partendo dall'ambito produttivo con simulazioni inerenti alla produzione e le catene di montaggio, passando per lo studio della movimentazione di materiali in cui vengono considerati i sistemi di trasporto e per l'ambito logistico e distributivo in cui viene dato particolare risalto alla progettazione della supply chain ed al flusso di lavoro in un centro di distribuzione. Inoltre, è anche utilizzato per simulare il flusso dei dati in una rete, il coordinamento marittimo delle navi, il flusso del traffico nel sistema autostradale e anche pedonale.

Il software è stato scelto perché, tramite queste sue peculiarità, ha permesso di creare facilmente il modello di simulazione ed arrivare allo scopo finale di questa analisi: applicare il sistema di *material handling* AVS/RS ad un magazzino e capire quali condizioni ottimizzano tutto il sistema ed i vantaggi e gli svantaggi che un'azienda può ricavarne dalla sua implementazione. Inoltre, è dotato di un'interfaccia grafica che permette il controllo e la valutazione della simulazione durante il tempo di processo.

Il programma opera ad eventi discreti e quindi l'evoluzione dello stato degli oggetti presenti nel modello è indipendente rispetto l'andamento del tempo ma è determinato dal verificarsi di determinati eventi.

La schermata principale del software è divisa in più sezioni, ognuna delle quali ha un preciso scopo, che sia esso di aiuto nella grafica o nella creazione del codice.

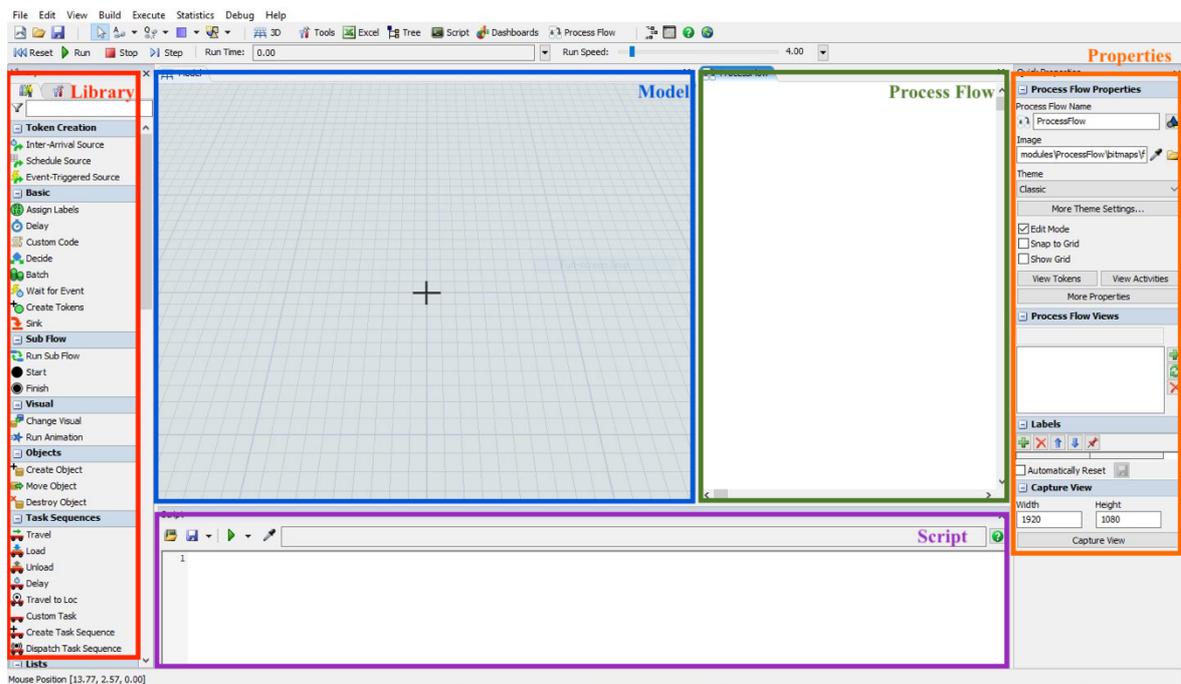


Figura 2.1 - Schermata Principale Flexsim

Nel riquadro rosso sono presenti le varie librerie per gli oggetti ed il process flow; nello spazio blu verranno creati gli oggetti in 3D e sarà possibile vedere la simulazione come opera o, in alternativa è possibile osservare la gerarchia del modello (l'albero); la sezione verde è quella indicata per la creazione del process flow e delle varie dashboards; il riquadro viola è quello indicato per la creazione del modello tramite compilazione di codice; lo spazio blu è quello usato per osservare le caratteristiche ed i valori di ogni oggetto.

Tutto questo insieme verrà analizzato di seguito.

Flexsim usa la libreria grafica *OpenGL* (Open Graphics Library) che, a livello più basso, è un semplice documento in cui sono definite delle precise funzioni ed il comportamento che devono avere. La scelta di questa libreria permette di avere una visione dello spazio realistica, comprendente una illuminazione di tipo dinamico ed effetti ambientali concreti.

Vi è la possibilità di creare un percorso di guida virtuale (*flypaths*) che dà l'opportunità allo sviluppatore ed a terzi di poter mostrare tutti gli elementi creati in una visione 3D e di creare filmati dello stesso per poter, qualora necessario, mostrare una presentazione del lavoro.

Flexsim permette varie visualizzazioni del modello: viste 2D planari, 3D ortografiche e prospettive e attraverso la sua gerarchia (tree). Questa caratteristica rende il software ancora più completo anche da questo punto di vista, con la possibilità di controllare tutto il modello da più prospettive e di poterlo sviluppare o modificare considerando ogni evento o movimento che avviene durante la simulazione.

Il software è predisposto anche all'analisi statistica di valori come la produttività di un'entità, lo stato dell'oggetto od il suo livello di utilizzo. Le dashboards sono interfacce grafiche utilizzate per una rappresentazione di queste analisi e possono essere predefinite e personalizzate dall'utente utilizzatore. Inoltre, altri collegamenti possono avvenire con foglio di calcolo e database per una analisi più completa possibile.

Per quanto riguarda lo studio dei dati, in Flexsim è presente l'*experimenter* ovvero uno strumento che crea set multipli di variabili in input ed indicatori di performance, li simula in modo simultaneo e, tramite dashboard, consente di avere una visualizzazione grafica immediata del report finale.

Solitamente di un modello si fanno più simulazioni per poter considerare vari scenari possibili realizzabili e, tramite i risultati finali, si sceglie quello più efficiente. Flexsim ha uno strumento chiamato *OptQuest* costruito con un algoritmo che riesce a scegliere in modo autonomo la situazione ottima, considerando i vincoli definiti e le funzioni obiettivo richieste.

Gli oggetti di Flexsim sono ampiamente personalizzabili e presenti in picklist già configurate da cui, usando la modalità *Drag and Drop*, si possono prendere gli elementi e posizionarli con il mouse. Nella libreria sono già presenti tutti gli oggetti base che possono essere adoperati nella costruzione del modello ed ognuno di essi è caratterizzato da comportamenti che sono parametrizzabili, combinabili e modificabili.

La libreria è composta da elementi implementati usando una metodologia orientata agli oggetti, che coinvolge una gerarchia di super-classi e sotto-classi. In questa ultima, gli oggetti ereditano il comportamento e gli attributi della classe superiore mentre lo "specializzano" per adattarsi ad una particolare situazione.

Le classi presenti in Flexsim sono [25]:

- **Fixed Resources** – le risorse fisse sono oggetti statici del modello che rappresentano le varie fasi del processo. L'item considerato nella simulazione entra in uno o più di questi oggetti durante l'esecuzione e non passa a quello successivo se non ha terminato di essere elaborato.

Alcuni di questi oggetti sono:

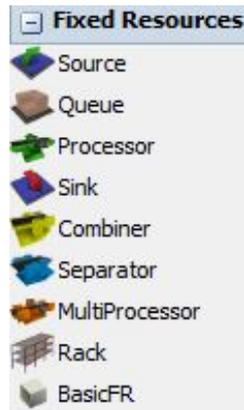


Figura 2.2 - Classe Fixed Resources

1. *Source*: la sorgente usata per creare gli item che viaggiano nel modello. Questa entità può creare una diversa classe di flusso ed assegnarne varie proprietà come il tipo di oggetto od il colore. Il tempo di creazione del flusso può essere definito secondo una statistica usando il tasso di inter-arrivo, considerando una lista di arrivo programmata od una sequenza di arrivo definita.
2. *Queue*: è la coda in cui un item viene stoccato nel caso in cui la risorsa a valle non può ancora accettare un item in ingresso. Di base questa funziona secondo una logica *FIFO* (*First In First Out*) secondo cui il primo pezzo in ingresso è il primo ad uscire. Con questa risorsa c'è la possibilità di unire tutti i pezzi in lotti prima di essere rilasciati.
3. *Sink*: è usato per distruggere gli item presenti nel modello e dei quali non è più possibile recuperare alcuna informazione.
4. *Rack*: è la scaffalatura adoperata per stoccare gli item come se fossero in un magazzino. L'utente può definirne tutta la dimensione, dal numero di posti in ogni canale, al numero di canali fino al numero di livelli. E' anche possibile specificare un determinato alloggiamento per ogni item. In parallelo a questo è possibile usare un trasportatore che porterà l'oggetto nell'ubicazione indicata.

- **Task Executer** – sono risorse condivise e mobili nel modello, sono quelle incaricate della movimentazione degli item.



Figura 2.3 - Classe Task Executors

Alcuni di questi sono:

1. *Dispatcher*: è un oggetto usato per gestire contemporaneamente più operatori o trasportatori. Riceve le varie attività che le risorse devono eseguire e le inoltra tramite connessione alle porte di uscita che possiede ogni risorsa.
 2. *Task Executer*: sono veicoli in grado di viaggiare, caricare e scaricare gli item presenti nel modello e anche agire come risorse condivise per permettere il processamento di varie stazioni. Rappresentano una classe top alla quale tutti gli oggetti nella libreria fanno riferimento. Anche questi, come gli *operator*, possono essere connessi ad una rete che definisce i loro movimenti.
 3. *Operator*: possono essere richiamati dagli item durante il tempo di setup, di processamento o di riparazione. Possono anche movimentare gli oggetti che devono essere portati in un punto specifico. Per muoversi nel modello possono essere connessi ad un network che definisce i loro movimenti.
 4. *Elevator*: è una risorsa che permette lo spostamento degli item solamente dall'alto verso il basso e viceversa.
- **Travel Networks** – sono i network che permettono di definire dei movimenti ben precisi alle risorse a cui sono uniti.

1. *Network Node*: sono i nodi usati per delineare una rete di percorsi che i trasportatori e gli operatori devono seguire. Possono essere modificati tramite punti “spline” che permettono una curvatura della retta.

- **Fluid** – in cui sono presenti undici oggetti progettati per gestire il materiale fluido. Nove di loro possono interagire con un altro oggetto discreto di Flexsim, mentre due funzionano esclusivamente da interfaccia tra oggetto fluido e discreto.
- **Visual** – che sono strumenti usati più per la decorazione dello spazio di simulazione con testo e diapositive in modo da rendere l’ambiente più realistico.

Finora sono stati analizzati gli oggetti che è possibile creare tramite e personalizzare tramite librerie e codice Flexscript, linguaggio di scripting interno a Flexsim. Alcuni utenti però potrebbero preferire un’interfaccia che renda più facile la scrittura e compilazione del codice senza dover usufruire del linguaggio di scrittura: proprio per questo nel software è stato progettato un modulo chiamato *Process Flow*; questo permette di costruire la logica dell’intero sistema di simulazione attraverso un’interfaccia visiva. È di facile utilizzo perché, al posto di scrivere righe di codice, è sufficiente selezionare l’attività pre-programmata appropriata dalla libreria e trascinarla nella sezione apposita. Grazie a questi blocchi di attività è facile scomporre il problema globale in casi più semplici a cui, combinando una logica sempre più articolata, si può rappresentare la situazione nel modo più realistico possibile.

Caratteristica importante del process flow è la sua capacità di adattamento a diversi tipi di modelli di simulazione: ciò è possibile grazie anche alla flessibilità con cui sono programmate le varie attività in libreria che permettono di risolvere uno stesso problema usando più criteri.

I diversi blocchi di attività possono essere collegati tra loro, organizzati nello spazio e raggruppati come meglio si desidera per semplificare la logica descritta. È anche possibile personalizzarle cambiando il font, i colori e le forme. Inoltre, sono molto utili durante il *debug* della simulazione perché permettono di capire visivamente il percorso e le attività che l’item deve seguire nel modello.

Nel process flow il *token* è l’elemento (solitamente un cerchio verde) che indica la posizione e l’attività che l’item deve eseguire nel modello.

Come detto, il process flow ha una libreria apposita che compare su Flexsim, al posto di quella inerente agli oggetti, solo quando si lavora con questo modulo e di cui ora analizzeremo le varie parti.

La libreria si compone di varie attività [26]:

- **Token Creation** – paragonabile alla *source* degli oggetti, in questo gruppo sono presenti le attività che creano i token che viaggeranno lungo tutto il processo.



Figura 2.4 - Attività Token Creation

1. *Inter-Arrival Source*: crea un token secondo uno specifico intervallo di tempo. La distanza tra una realizzazione ed un'altra può avvenire secondo un numero fisso oppure impostata considerando una distribuzione statistica che consideri il tempo degli arrivi.
 2. *Schedule Source*: produce nuovi token considerando il tasso di arrivo definito in una tabella. In questo riquadro possono essere specificati il tempo di creazione dei token, il nome che gli verrà assegnato e quanti in numero devono essere creati.
 3. *Event-Triggered Source*: il token viene immesso nel process flow solo in seguito al verificarsi di un determinato evento durante la simulazione.
- **Basic** – queste attività vengono largamente utilizzate in quasi tutte le tipologie di process flow.

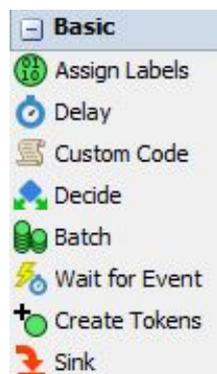


Figura 2.5 - Attività Basic

1. *Assign Labels*: attività destinata alla creazione o modifica di “etichette” assegnate al token, utili per la memorizzazione di dati significativi.
 2. *Delay*: il token rimane in questa attività per un certo periodo. Questo lasso di tempo può essere un numero fisso, può essere determinato prendendo un valore dal token stesso, può essere calcolato tramite distribuzione statistica.
 3. *Custom Code*: questa attività consente di personalizzare il comportamento del token nel process flow. È possibile creare codici customizzati, usando il linguaggio Flexscript, che verranno elaborati dal token prima di passare all’attività successiva, senza che passi del tempo.
 4. *Decide*: è possibile decidere dove mandare il token considerando una serie di uscite possibili e i vincoli imposti dall’utente.
 5. *Wait for Event*: in questo blocco il token viene trattenuto finché non occorre un determinato evento nel processo.
 6. *Sink*: simile all’oggetto discreto, questa attività elimina il token e tutte le informazioni in esso contenute.
- **Sub Flow** – queste attività sono eseguibili solo nel caso in cui si crei un process flow secondario.
 1. *Run Sub Flow*: inizia il processamento di un process flow secondario. Quando il token entra in questa attività, invia uno o più token “figli” al sotto-processo.
 2. *Start – Finish*: rappresentano l’attività di inizio e fine del processo secondario.
 - **Visual** – attività atte alla modifica della grafica di un oggetto o all’esecuzione di una animazione durante la simulazione.
 - **Objects** – Queste attività si occupano della creazione, dello spostamento e della distruzione di elementi come gli item presenti nel modello, risorse fisse o task executer.

- **Task Sequences** – queste attività possono essere assegnate ai task executer per fargli compiere delle precise azioni con gli item. Queste azioni vengono visualizzate durante l'esecuzione del modello

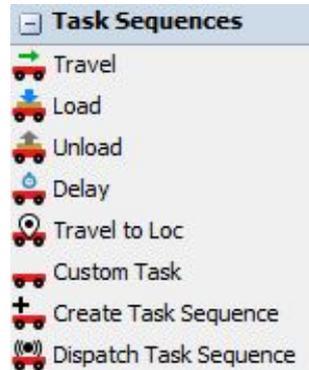


Figura 2.6 - Attività Task Sequences

1. *Travel*: attività che permette al task executer di viaggiare verso una precisa destinazione con sopra un oggetto modellizzato.
 2. *Load*: viene caricato un oggetto della simulazione sopra un task executer.
 3. *Unload*: l'oggetto viene scaricato.
 4. *Delay*: la partenza dell'attività successiva viene ritardata di un certo periodo di tempo.
 5. *Travel to Loc*: attività che indica la precisa destinazione del task executer.
- **Lists** – attività utilizzate per creare e gestire liste dinamiche e non nel modello contenenti informazioni sugli item o su oggetti di cui si richiedono le statistiche.
 1. *Pust to List*: attività usata per aggiungere token, task executer, numeri o stringhe ad una lista e conservarne i valori.
 2. *Pull from List*: attività atta a recuperare le entità presenti con le informazioni ad esse associate.
 - **Resources** – attività dedicate alla creazione e alla direzione delle risorse presenti nel modello.
 1. *Acquire Resources*: attività addetta all'acquisizione di una o più risorse in un momento specifico durante la simulazione. Una volta acquisita, il

numero delle risorse simili viene diminuito del valore equivalente alle risorse utilizzate.

2. *Release Resources*: contrariamente alla precedente, questa attività “libera” la o le risorse che erano state acquisite per svolgere un determinato compito e la disponibilità di tali oggetti viene aumentata.
- *Zones* – nel modello può essere necessario definire delle zone, anche fittizie, in cui il token deve rimanere finché non occorre una nuova attività a cui essere sottoposto.
 1. *Zone*: questa attività può raccogliere informazioni statistiche non disponibili per l’attività standard. Può inoltre limitare l’accesso ad un determinato cammino del process flow a token che non rispettino determinati vincoli.
 2. *Enter Zone* ed *Exit Zone*: la prima attività è quella in cui il token richiederà l’ingresso in un determinato punto del process flow; la seconda individua il punto in cui uscirà dalla zona.
 - *Display* – le attività qui raggruppate non hanno alcuna funzione attiva durante la simulazione, ma sono utili da un punto di vista grafico.

2.4. *Modello di Simulazione*

Il modello che è stato creato e che verrà discusso in questo paragrafo consente di simulare il comportamento di un AVS/RS a supporto di un magazzino di dimensione qualunque, costituito da un numero arbitrario di shuttle (purchè minore dei piani della scaffalatura a disposizione) in diverse condizioni di utilizzo.

Il modello è costituito da due parti principali. In primo luogo, vi è uno script – compilato in linguaggio di programmazione Flexscript – che acquisisce un insieme di variabili valorizzate dall’utente e di occupa di inserire nel modello tutti gli oggetti necessari con le relative caratteristiche ed informazioni iniziali. Il modello così creato viene poi gestito tramite un *process flow* in cui sono raccolte le regole di funzionamento del sistema e che gestisce anche le librerie di grafica 3D con cui è possibile visualizzare in tempo reale lo stato del sistema simulato.

2.4.1. *Assunzioni*

Il modello è stato costruito assumendo alcune condizioni sulla logica applicata agli oggetti ed alla loro realizzazione in grafica 3D.

Tipicamente, per massimizzare l'utilizzo delle risorse, i magazzini serviti da AVS/RS presentano il corridoio di viaggio degli shuttle al centro della scaffalatura, a meno di vincoli particolari. Il magazzino è quindi costituito da un'unica struttura; nel modello realizzato, invece, sono implementati due scaffali che rappresentano gli spazi di deposito posti sui due lati opposti del corridoio usato dagli shuttle.

Nel sistema di riferimento, l'asse x corrisponde a quello orizzontale, l'asse z coincide con quello verticale e l'asse y corrisponde alla profondità del canale. Su tali assi possono viaggiare, rispettivamente, shuttle, lift e satellite.

Il modello si basa sulle seguenti assunzioni:

- Tipologia di Udc: il modello è in grado di gestire Udc tutte dello stesso tipo e delle medesime dimensioni;
- Proprietà dei rack: i due rack sono posizionati in modo simmetrico rispetto all'asse x (che, quindi, rappresenta la traiettoria centrale degli shuttle). Per entrambi gli scaffali, il corridoio ha inizio sulla coordinata $x=0$ e prosegue lungo l'asse delle x positive. I corridoi condivisi da due magazzini presentano la stessa lunghezza e la stessa altezza. Asimmetrie del rack: il primo livello può essere posizionato al piano terra o essere rialzato rispetto ad esso; si può considerare il rack completamente interrato con profondità desiderata; si può avere una soluzione intermedia che prevede un livello semi-interrato specificando da input quanto debba essere situato sotto il piano terra. Per ragioni strutturali, è possibile che non tutti i canali abbiano le stesse caratteristiche (ad esempio, per il passaggio di una colonna portante dell'edificio). Tali impedimenti sono modellati tramite Udc di tipo diverso da quelle stoccate e non prelevabili.
- Possono cambiare, viceversa, la profondità dei canali e, quindi, la quantità di merce stoccabile nei rack. La capacità del magazzino di sinistra deve essere sempre maggiore di 0 altrimenti la simulazione non avrebbe luogo e non avrebbe senso di esistere. La capacità del magazzino di destra può essere pari a 0: in questa situazione si può considerare il corridoio come estremità del magazzino;
- AVS/RS: il lift può trasportare una combinazione shuttle-satellite alla volta. Shuttle e satelliti non sono intercambiabili fra loro. Per ragioni di sicurezza, in un livello del magazzino può operare al più una sola coppia shuttle-satellite.
- Logiche di stoccaggio: ne sono state implementate tre
 1. *Closest Channel*: l'Udc in ingresso viene collocato nel canale disponibile più vicino all'ascensore;

2. *Closest Floor*: l'item viene inviato al piano più vicino rispetto al piano terra che ha posti disponibili;
3. *Random*: la scelta del piano e del livello avvengono in modo casuale.

Il criterio decisionale è identificato da un numero assegnato ad una variabile globale: 1 per il CC (Closest Channel), 2 per il CF (Closest Floor) e 3 per il Random. Il criterio adottato per il prelievo si basa sull'età delle Udc: si preferisce prendere l'ultima entrata in magazzino

- Gestione delle operazioni: la scelta dei veicoli da impiegare in una operazione è basata sulla distanza; si preferisce utilizzare il veicolo più vicino.
 1. Nel caso dello *stoccaggio* si considera la distanza, in valore assoluto, sull'asse delle z tra lo shuttle e l'ascensore a cui viene sommata la distanza sull'asse orizzontale a cui si trova il veicolo;
 2. Nel caso di *ripresa* di un item, si valuta la somma delle distanze in valore assoluto tra la posizione z dello shuttle, quella del lift e quella dell'item da prelevare a cui si aggiunge lo spazio sull'asse x del veicolo;

2.4.2. Creazione automatizzata del modello

Come anticipato, la creazione del modello è stata automatizzata tramite la realizzazione di un apposito script che genera tutti gli oggetti discreti presenti nel modello e le relative connessioni. Tutti i valori assegnati agli oggetti sono salvati come variabili globali in modo da rendere il modello più flessibile in caso di variazioni delle proprietà. Tutti gli oggetti vengono realizzati attraverso la funzione *createinstance* che dà in output un elemento della classe definita posizionato nella locazione scelta – nel caso in esame è scelta sempre la soluzione *model()*.

Scaffalature. Al *Rack* sono associati i valori riguardanti il numero di piani, il numero di canali, l'altezza di ogni livello, la lunghezza e la profondità di ogni canale. Dopo aver nominato l'elemento, ne viene definita la posizione iniziale tramite le funzioni *location.x*, *location.y*, *location.z*.

La scaffalatura disposta sul lato sinistro subisce poi una rotazione di 180° rispetto all'asse z per poter permettere ai veicoli di stoccare le merci in modo realistico. Per default, nell'oggetto *Rack* definito in Flexsim le Udc vengono stoccate dalla posizione più vicina all'ingresso del canale verso la più lontana. Questo, però, implica che le Udc possano

scavalcarsi reciprocamente, portando a un comportamento non realistico. La rotazione descritta permette di risolvere questa criticità.

Lo script viene utilizzato anche per fornire al modello una descrizione formale delle logiche di stoccaggio delle Udc. Di volta in volta, la posizione scelta per lo stoccaggio sarà salvata tramite le variabili *racklevel* e *rackchannel* che indicano rispettivamente quale livello e canale deve occupare l'entità.

Lo stesso procedimento è applicato per la creazione della seconda scaffalatura alla quale viene dato un nome diverso (*Rack2*). Unica differenza è il controllo fatto a monte della realizzazione dell'oggetto in cui si va a verificare se la sua capacità sia diversa da 0, ovvero se in questo rack sia possibile stoccare.

Traiettorie dei veicoli. Successivamente, vengono creati i *nodi* che fanno riferimento al movimento dell'ascensore. Tutti questi sono posizionati esattamente alla stessa quota del piano della scaffalatura in modo che il lift si fermi in posizione corretta. Il magazzino preso in analisi ha un livello che si trova per una parte sotto la quota $z=0$. Per risolvere questa situazione si sono inizializzate due variabili (*first_under_level* e *perc_under_level*) con le quali si identifica il livello interrato e di quanto percentualmente è sottoterra. I primi nodi creati sono quelli relativi al movimento verticale dell'ascensore. Tutti vengono implementati tramite ciclo: il primo verifica la presenza di un livello interrato; il secondo provvede ad unire i nodi tra di loro per creare il percorso ed il terzo costruisce il nodo relativo al livello interrato nella giusta posizione. I nodi vengono raggruppati in un insieme che prende il nome di "LevelNode". Il nodo che fa riferimento al piano terra e interagisce con le baie per il carico/scarico delle Udc viene inserito in un gruppo nominato "LoadingStationNode". I cicli successivi provvedono alla creazione dei nodi che fanno riferimento all'ingresso dei canali di entrambi i rack, alla loro unione tramite la funzione *contexdragconnection*, al loro inserimento in un gruppo chiamato "BayNode" e all'assegnazione di un rango specifico in modo da essere univocamente riconoscibili.

Sorgenti di Udc. Il modello prevede la creazione di 5 sorgenti di Udc che si differenziano per il loro scopo:

- *SourceStorage* crea le Udc di cui sarà richiesto lo stoccaggio nel corso della simulazione. Occorre specificare la distribuzione che descrive il tempo di inter-arrivo fra due Udc consecutive e i suoi parametri;
- *InitialWallSX* e *InitialWallDX* creano le Udc fittizie che descrivono asimmetrie e impedimenti strutturali del magazzino;

- *SourceInitialSX* e *SourceInitialDX* creano le Udc necessarie per inizializzare il contenuto del magazzino.

Code di attesa. La creazione delle code relative agli item in ingresso e quelli in uscita e del lift sono quasi identiche. Chiamate *StorageBay* e *RetrievedBay* le prime due e *Lift* la terza entità, tutte sono posizionate nello spazio tramite valori predefiniti. Nella compilazione del codice dell'ascensore sono inseriti due valori riguardanti la sua accelerazione e velocità.

Veicoli (shuttle e satelliti). Il numero di veicoli da creare nel modello è inserito da input dall'operatore. Questo valore è salvato nella variabile *num_agv* usata come limite di un ciclo *for* che realizza tutti i veicoli voluti con le relative caratteristiche (ad esempio la velocità, l'accelerazione, le grandezze, il colore e la posizione).

Eseguendo lo script, gli oggetti modellizzati appaiono come in figura 2.7: sono visibili le 5 risorse, la baia relativa agli item da stoccare e quella per l'operazione di retrieval, i due rack, gli shuttle ed i relativi satelliti, il lift ed i nodi. I nodi sull'asse *z* perpendicolari al lift definiscono il suo percorso tra i livelli; quelli presenti tra i rack invece delineano il cammino che devono seguire shuttle e satelliti durante le attività di stoccaggio/ripresa di Udc.

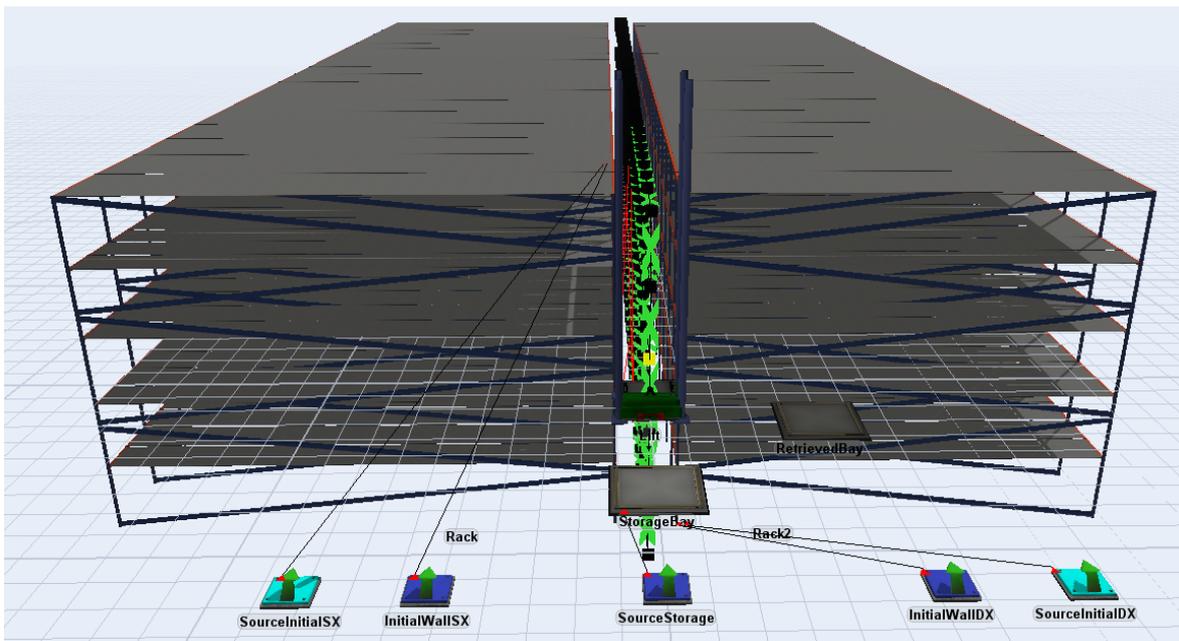


Figura 2.7 - Rappresentazione degli oggetti modellizzati. Visione frontale

La figura 2.8 invece mostra invece tutto il magazzino con gli item stoccati e gli impedimenti strutturali, di colore nero, che non possono essere ripresi e che definiscono posizioni in cui non possono essere stocate Udc.

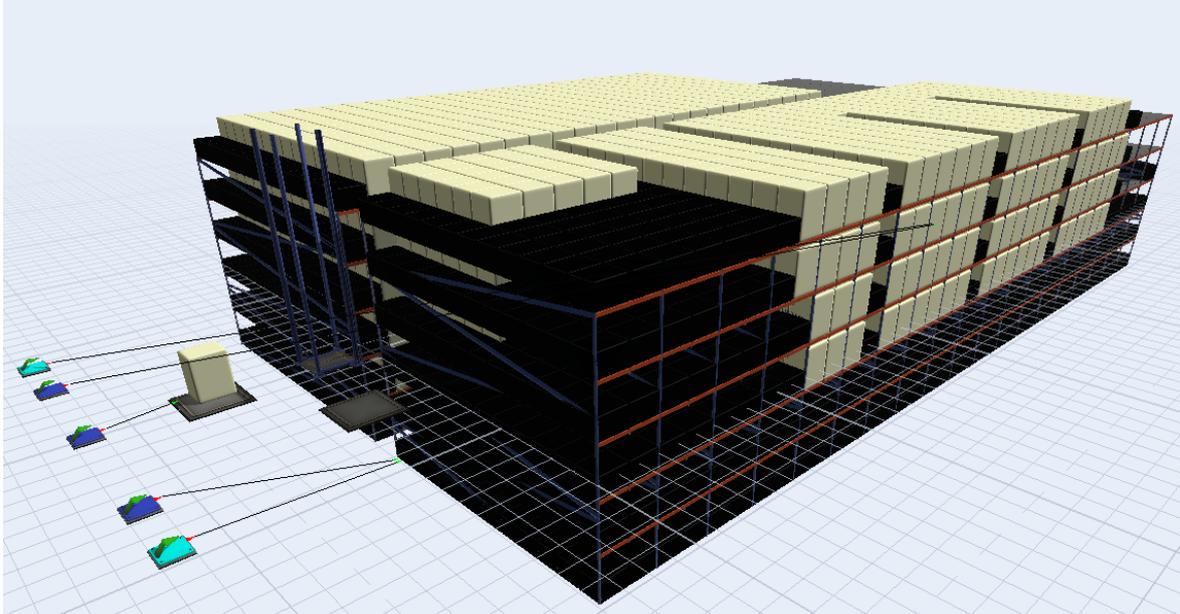


Figura 2.8 - Magazzino con item ed impedimenti strutturali

2.4.3. *Process Flow*

Nel process flow è definito il percorso che ciascun token (ovvero la rappresentazione grafica di un ordine in ingresso o uscita) deve seguire, le varie informazioni che deve salvare e le attività che deve far eseguire agli oggetti modellizzati.

All'inizio della simulazione vengono creati gli item che corrispondono agli impedimenti strutturali presenti nel magazzino. Nel caso di coda sono stoccati in una baia apposita visibile dopo la creazione del modello [figura 2.9].

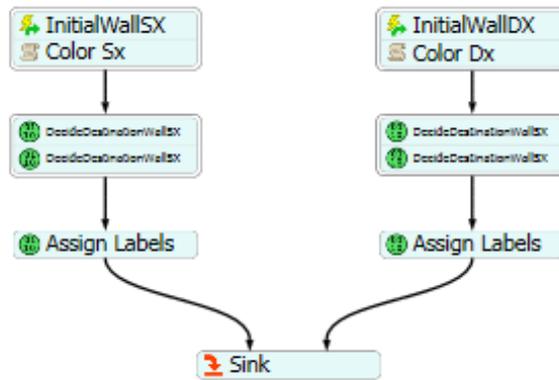


Figura 2.9 - Creazione degli impedimenti strutturali

Le loro posizioni sono prese da tabella per entrambe le scaffalature.

Successivamente si passa all’inizializzazione del contenuto del magazzino. La posizione di tali Udc è acquisita da una matrice a sua volta importata tramite un foglio di lavoro Excel . Questo accorgimento, diversamente da una inizializzazione casuale, permette di utilizzare una stessa configurazione iniziale per osservare la ripetibilità del sistema o le differenze

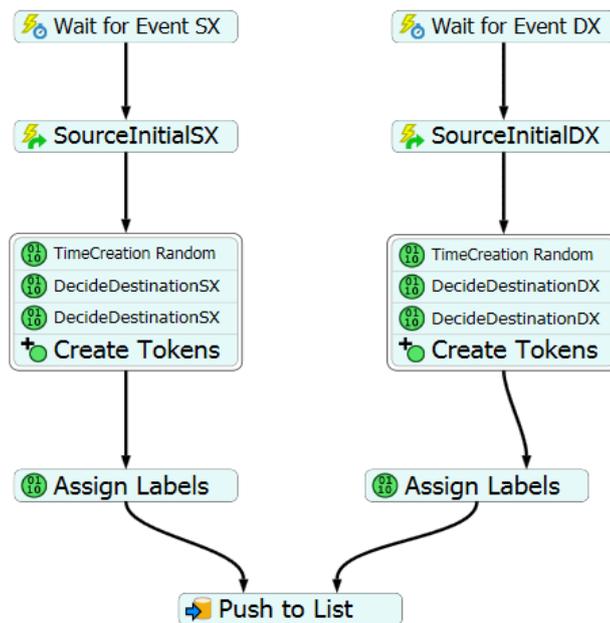


Figura 2.10 - Creazione item nel tempo 0

dovute a diversi scenari di impiego. Di questi prodotti è utile salvare il tempo di creazione e poi quello di presa dal magazzino per calcolarne il tempo di giacenza [fig. 2.10].

Tutti i token relativi alle Udc fin qui create vengono inseriti in una lista che comprende tutti i prodotti presenti in magazzini e che è possibile prelevare.

I token creati successivamente, invece, potranno iniziare il percorso che li porterà a stoccare o riprendere un item dal rack. Ciascuno di essi, una volta originato, riceve tre etichette: una si riferisce all'ubicazione dell'item, una chiarisce se l'item è prelevabile o se vi sono altre Udc adiacenti che ne impediscono la presa, ed una che lo qualifica come token di stoccaggio o di ripresa.

Una volta acquisito il lift per poter iniziare la simulazione, si controlla che tipo di operazione debba fare il token: stoccaggio o ripresa.

Nel caso sia un token di stoccaggio, si controllerà in primis il criterio con il quale decidere la posizione, poi, tramite decide, si controlla che non ci sia un veicolo nello stesso livello in cui stoccare il nuovo item e successivamente, tramite *custom code*, viene definito per ogni veicolo quale sia il più vicino a svolgere l'operazione.

In seguito, ordinati i veicoli in ordine ascendente di distanza, vengono impegnati shuttle e satelliti più vicini [figura 2.11].

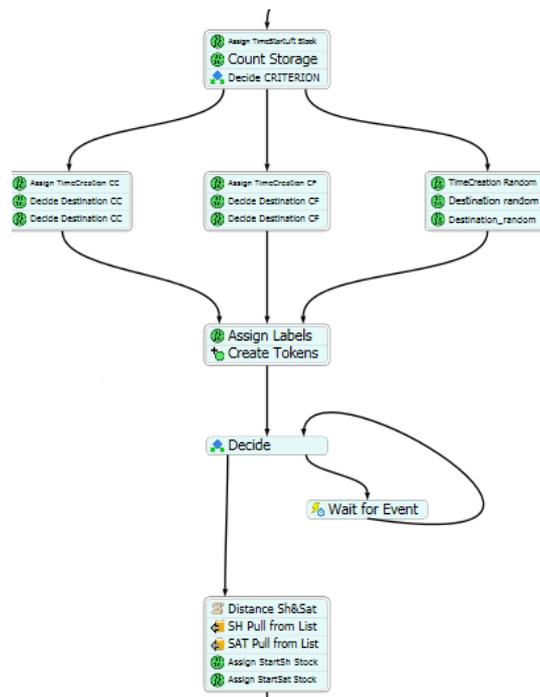


Figura 2.11 - Decisione stoccaggio item, verifica locazione shuttle e acquisizione veicoli

Al termine di queste attività ne è presente una che si dirama in 3 uscite che portano ad un cammino specifico a seconda della posizione dello shuttle e dell'ascensore: la prima uscita è utilizzata nel caso i veicoli siano entrambi al piano terra, la seconda nel caso in cui il lift non si trovi a livello 0 e l'ultima nel caso in cui alcuno dei due veicoli sia al piano terra.

Nel primo caso il modello continua senza alcuna deviazione, nel secondo si riporta l'ascensore al livello corretto e nel terzo caso il lift si dirige al livello dove è posizionato lo shuttle, lo carica e si dirigono al piano terra [figura 2.12].

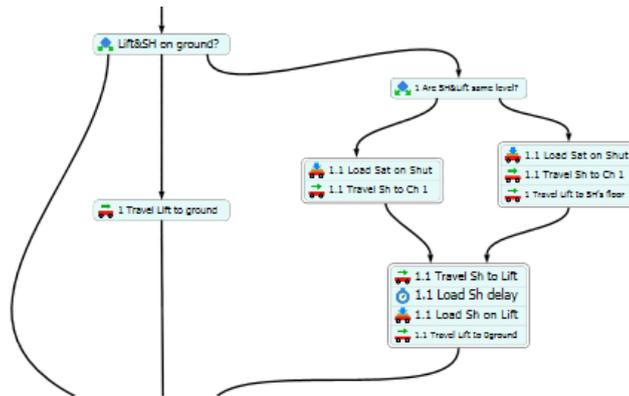


Figura 2.12 - Triforcazione del lato *storage* basata sulla posizione dei veicoli

Una volta a terra, il satellite carica l'item ed inizia il viaggio per portarlo nella posizione definita tramite criterio iniziale. Unica diramazione che si trova nel process flow dello stoccaggio è la scelta di quale rack dovrà accogliere l'oggetto in entrata tramite la variabile *unif* definita alla partenza del token.

Un percorso molto simile lo si ha con la situazione di *retrieval*. All'inizio viene deciso l'item da riprendere e la relativa posizione, si controlla se è presente un veicolo sul livello interessato dalla movimentazione e tramite *custom code* sono decisi i veicoli più vicini che vengono impegnati.

Anche in questa situazione si ritrova la triforcazione:

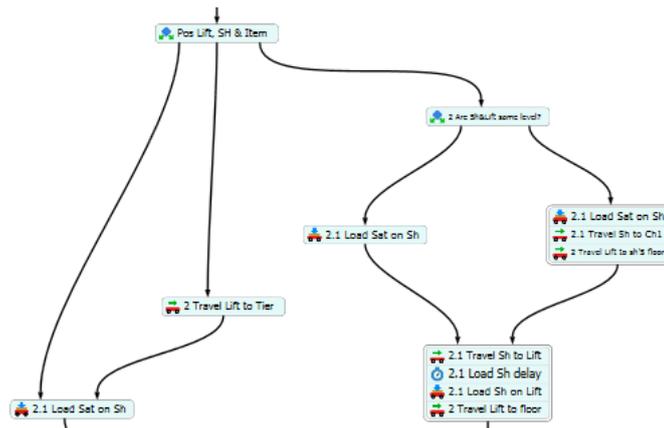


Figura 2.13 - Triforcazione del lato *retrieval* basata sulla posizione dei veicoli

Similmente al caso di stoccaggio, la prima uscita non implica particolari attività, la seconda porta il lift a livello dello shuttle se questo si trova a piano z pari a quello dell'item da prelevare ed il terzo caso è quello in cui shuttle e lift devono viaggiare fino alla quota z dell'item da prelevare [figura 2.13].

Successivamente viene controllato da quale rack deve essere prelevato l'oggetto e poi vi è il percorso normale di ritorno con le relative attività, di shuttle, satellite e lift.

Le attività inerenti al proseguimento del percorso sono relative al carico e allo scarico delle entità una sopra l'altra per potersi muovere insieme come un unico oggetto e condurre l'Udc nella baia di competenza. Al termine di ognuna di queste attività si assegna una posizione precisa ai veicoli in modo che sia sempre possibile sapere la loro posizione e siano sempre nella posizione giusta per svolgere il compito. Al termine del process flow, tutte le informazioni contenute nel token ed inerenti all'Udc, vengono salvate in due liste attinenti una agli oggetti stoccati ed un'altra relativa a quelli in uscita dal magazzino.

3. Caso studio

3.1. Analisi dell'ambiente Food & Beverage

Il mercato del Food & Beverage a livello europeo e mondiale è un contesto dinamico ed in lieve ma costante crescita e lo stesso settore può essere definito avente una natura di per sé complessa, da un punto di vista di domanda e di offerta.

Le abitudini delle persone di 20 o 30 anni fa erano quelle di recarsi in un luogo adibito alla ristorazione, in caso si volesse consumare un pasto fuori di casa, o quelle di recarsi in un pub se si preferisse sorseggiare una bevanda. Al giorno d'oggi vi è la possibilità di mangiare e bere a qualsiasi ora ed in qualsiasi luogo e ciò fa sì che si aumenti l'offerta delle attività.

Le aziende fornitrici della materia prima necessaria al soddisfacimento di questo nuovo stile di vita hanno dovuto adeguare la loro catena logistica ad una richiesta sempre più esigente da parte delle società clienti. Ciò ha portato ad aggiungere ulteriore complessità ad un ambiente che lo era già di suo, ma ha fatto sì che potesse offrire enormi opportunità.

In termini di tempo e costi, il cliente è diventato negli anni sempre più esigente e questo ha portato le imprese a rivedere tutta la propria organizzazione per migliorare sotto questo punto di vista.

Sono 3 le principali strategie che un'azienda può adottare per migliorare le proprie performance economico-finanziarie: esportazione, tipicizzazione ed innovazione [27].

L'esportazione è la prima soluzione per un settore in crisi anche a fronte di investimenti iniziali non indifferenti da un punto di vista economico; la tipicizzazione del prodotto (DOP, IGT) è sicuramente un punto di forza di aziende medio-piccole che si vedono contrastate da multinazionali in termini di qualità e quantità della produzione; l'innovazione può risultare un vantaggio se utilizzato nel modo corretto e nei punti più adeguati della filiera logistica.

Il rinnovamento della supply chain è guidato ed imposto dal fattore "costo" e dalla sua minimizzazione.

La situazione che si osserva al momento vede i distributori all'ingrosso ed al dettaglio che tendono sempre più a ridurre le aree destinate allo stoccaggio temporaneo; di contro i fornitori cercano di andare incontro alle esigenze ed ai vincoli contrattuali con i clienti, mantenendo un determinato livello di scorta presso i loro magazzini o anche recuperarla velocemente a fronte di una richiesta di spedizione.

L'azienda analizzata è una produttrice di pasta a livello internazionale che esporta la maggior parte dei propri prodotti. Ha deciso di rinnovare e modernizzare il proprio magazzino automatico introducendo il sistema di movimentazione AVS/RS in modo tale da poter contare su una flessibilità maggiore e, quindi, una risposta puntuale al cliente.

3.2. *Caso Studio*

Il pastificio considerato è sempre riuscito ad andare incontro ai gusti variegati della sua clientela e a superare ostacoli che ne mettevano in difficoltà il proseguo, come ad esempio l'entrata in vigore nel 1985 delle norme riguardanti la sicurezza dell'energia e dei macchinari: a questa richiesta degli organi di controllo, ha risposto imponendo al suo prodotto una superiore qualità piuttosto che una maggiore quantità.

È dotato di una filiera controllata ed ha acquisito un mulino che potesse sempre più soddisfare i gusti dei consumatori e mantenere una salda posizione sul mercato.

Questa ricerca continua di un elevato di qualità trova conferma nelle certificazioni che l'azienda ha conseguito, tra cui la ISO 9001:2008 che specifica *i requisiti dei sistemi di gestione per la qualità da utilizzarsi*, e le conformità a cui ha aderito, come lo standard IFS e BIOLOGICO – entrambi inerenti alla qualità che deve essere riservata al cibo organico.

Sempre inerente al mantenimento di un alto livello di servizio e di qualità, l'impresa ha instaurato una forte partnership con l'azienda svizzera Bülher che fornisce i macchinari appositi per la produzione della pasta.

La materia prima usata da questa azienda è la semola di grano duro (*triticum durum*) che, tramite trafilatura al bronzo, è esaltata di tutte le sue caratteristiche e proprietà. La filiera, di conseguenza, è stata pensata ed adattata per esprimere al massimo le potenzialità del grano e per poter gestire tutti gli ordini nella maniera più semplice. Questa consta di:

- 1 linea di pasta lunga Buhler del 2009 da 4000 Kg/h;
- 1 linea di pasta corta Buhler del 2006 da 4000 Kg/h;
- capacità di stoccaggio della materia prima di 180 tonnellate;
- 8 linee di confezionamento che permettono di confezionare fondo quadro, con grammature di 0.5 Kg, 1 Kg, 3 Kg e 5 Kg in scatole americane e cartoni espositori. Ogni linea è dotata di metal detector e controllo peso;
- magazzino automatico da 6000 posti pallet;
- magazzino tradizionale per carichi da 1500 posti pallet;
- un laboratorio attrezzato per analisi screening sulla materia prima e prodotto finito.

La produzione annua è approssimativamente di 360.000 tonnellate di prodotto: circa il 30% è prodotto sotto il proprio marchio per la vendita in Italia, Corea e Austria, il restante è venduto sotto forma di produzione in conto terzi.

In Italia il prodotto è venduto direttamente ai retailer, altrimenti viene distribuito all'estero. L'esportazione comprende il 95% della produzione di cui il 65% rimane in Europa. La Corea ed il Giappone rappresentano il segmento di mercato a cui vendere prodotti di qualità molto superiore.

Ad oggi si sta pianificando di aumentare la capacità di stoccaggio delle materie prime nei silos aziendali e completare il parco di pannelli solari, che al momento copre il 16% del fabbisogno energetico aziendale.

3.3. Il processo produttivo

Al fine di poter comprendere il funzionamento del magazzino automatico e poterne definire i requisiti, la fase preliminare di questo lavoro è stata la raccolta dei dati inerenti alla produzione per avere informazioni riguardo la tipologia e la quantità dei prodotti realizzati.

I dati raccolti sono inerenti alle fasi conclusive del ciclo di produzione ovvero il confezionamento e l'invio al magazzino.

3.3.1. Confezionamento

In questa fase vi è la creazione dei lotti che dovranno essere confezionati. Ciascun lotto può essere formato da un singolo pallet o da due pallet sovrapposti; ad ognuno è associato un codice identificativo univoco ma il sistema informativo tende a valutare esclusivamente l'ID del pallet inferiore come identificativo di tutto il lotto.

Di ogni operazione di confezionamento si conoscono la data e l'ora di inizio e fine ed il numero di colli presenti in ciascun pallet.

3.3.2. Invio al magazzino

Le confezioni così composte sono inviate al magazzino. In questa fase si tiene traccia delle dimensioni e del peso delle confezioni e sono valutati diversi stati delle macchine che svolgono l'operazione:

- *Registrata*: l'operatore carica il lotto sul magazzino;
- *Occupata*: il magazzino conferma l'avvenuta ricezione del lotto;
- *Validata*: il magazzino segnala di aver preso in carico la gestione del lotto;

- *Vuota*: è il momento in cui il veicolo risulta scaricato del pallet e pronto per una nuova operazione.

3.3.3. Gestione del magazzino

Una volta entrata in magazzino, la movimentazione dell'Udc viene gestita da un Warehouse Management System (WMS) che analizza e salva i dati di ogni missione di ogni pallet. Tra questi ci sono:

- Data ed ora della registrazione;
- SSCC del pallet coinvolto. Questo valore sarà usato come univoco ed identificativo dell'unità;
- Movimento di *Leaving* (in ingresso) e *Taking* (in ingresso);
- Quote di destinazione di inizio e fine di ogni missione espresse nel sistema di riferimento del magazzino;
- Numero di micro-missioni.

In particolare, di ogni SSCC si possono verificare diversi scenari:

- Due missioni di tipo *leaving* che indicano inizio e fine delle operazioni di stoccaggio di un'unità ancora presente nel magazzino nel periodo di analisi;
- Due missioni di tipo *taking* che definiscono gli istanti di inizio e fine delle operazioni di ripresa di un pallet il cui ingresso nel magazzino non è stato registrato;
- L'unione dei primi due scenari nel caso in cui il pallet sia entrato ed uscito nel periodo considerato per le analisi.

3.4. Analisi descrittiva dei dati aziendali

I dati in possesso relativi al pastificio comprendevano valori relativi al 2017 e parte del 2018. Per questo lavoro ci si è soffermati esclusivamente ai valori del 2017 per avere una panoramica annuale del funzionamento del processo di confezionamento e delle attività del magazzino.

3.4.1. Numero di colli

Il numero di lotti in uscita dalla fase di pallettizzazione è 53.704 e di questi, solo 53.563 vengono inviate alla fase di incelofanatura: vengono perse informazioni su 139 unità, lo 0,26% del totale.

Per sfruttare al massimo la disponibilità volumetrica del magazzino, alcuni pallet vengono posti uno sopra l'altro per essere gestito come singolo. Tra tutte le unità presenti in magazzino, 27.766 colli sono costituiti da un solo pallet (sono il 51,7% del totale), 25.938 sono formati da pallet doppi e sono il 48,3% del totale.

Non tutte le Udc vengono stoccate nel magazzino automatizzato: in deposito entrano 44.505 confezioni mentre le rimanenti 9.059 vengono spedite direttamente. Fra quelle che entrano, 25.914 sono costituiti da pallet sovrapposti ovvero il 58,2%.

In figura 3.1 sono rappresentati in blu il numero di unità in uscita dal confezionamento ed in arancione quelle in ingresso in magazzino, suddivise per settimane. Non vengono considerate le settimane di fermata dello stabilimento 30 gennaio – 5 febbraio, 14 agosto – 3 settembre, 30 ottobre – 5 novembre.

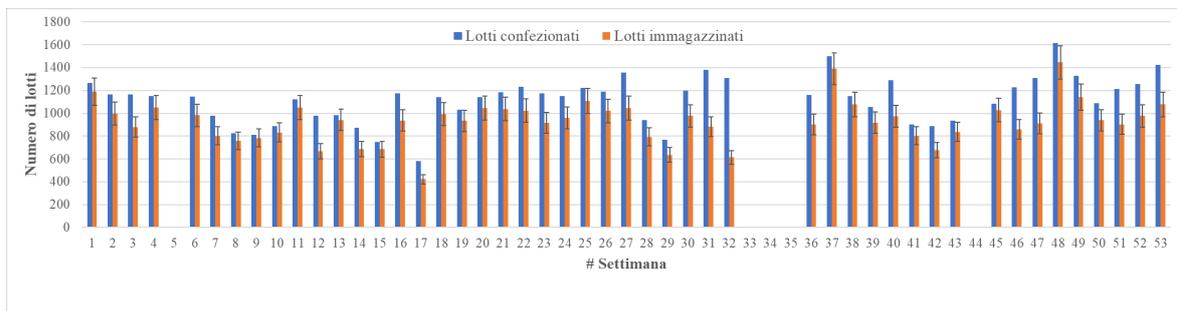


Figura 3.1 - Numero di lotti in uscita dal confezionamento (blu) ed in entrata nel magazzino (arancione)

Le barrette presenti su ogni colonna inerente ai pallet in ingresso hanno una dimensione pari al 10% delle unità stoccate con le quali si è verificato il bilanciamento tra i lotti confezionati e quelli stoccati. In 13 settimane su 48 vi è una discrepanza superiore a tale soglia, ovvero a causa di consegne urgenti molti colli sono stati spediti direttamente al cliente al termine della produzione.

3.4.2. *Tempi di formazione dei lotti*

I dati inerenti alla fase di confezionamento definiscono il tempo impiegato a formare un lotto. Sono comprensivi dei tempi necessari per riempire il pallet ed imballare l'unità, ma dipendono fortemente dal tasso di arrivo dei colli. È stato dunque valutato il tasso di uscita dei lotti da questa stazione, pari al numero di unità che devono essere stoccate in magazzino. È stato anche esaminato il tempo di processamento medio rilevato in ciascuna settimana che, indicativamente, inizia il lunedì mattina e finisce il venerdì sera.

È possibile evidenziare dalle figure seguenti che non tutte le confezionatrici sono utilizzate tutte le settimane.

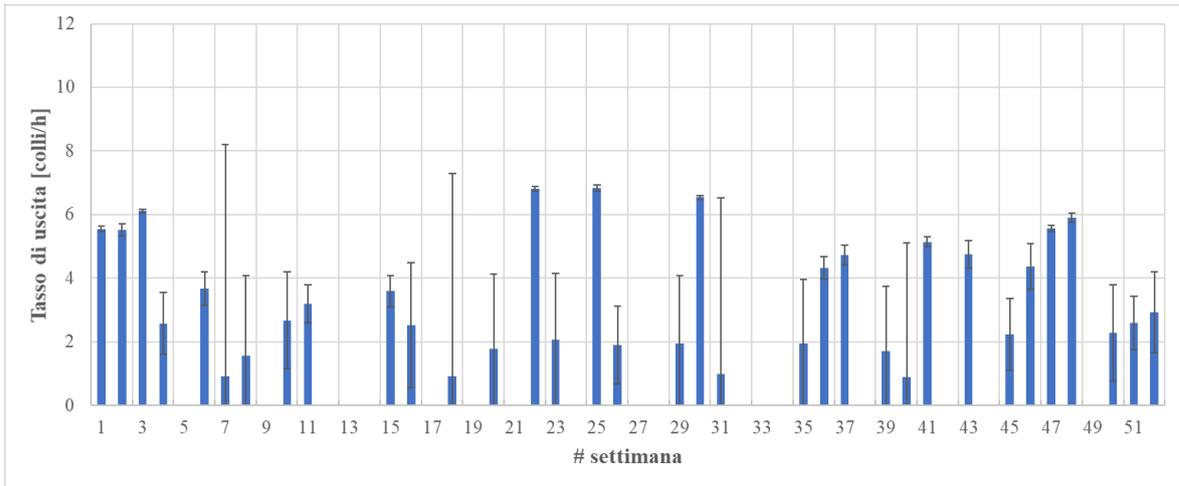


Figura 3.2 - Tassi medi di uscita della confezionatrice 1

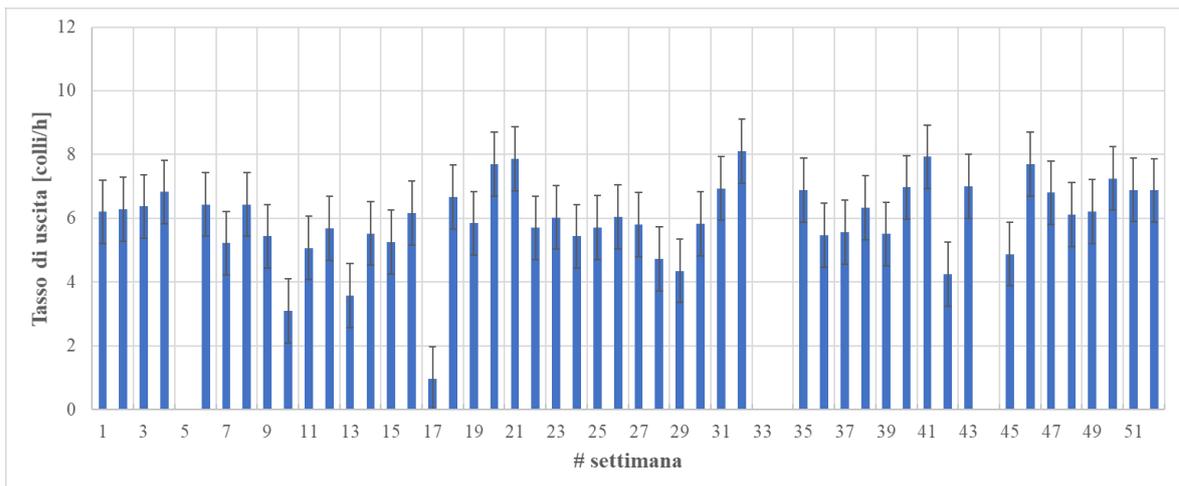


Figura 2.3 - Tassi medi di uscita della confezionatrice 2

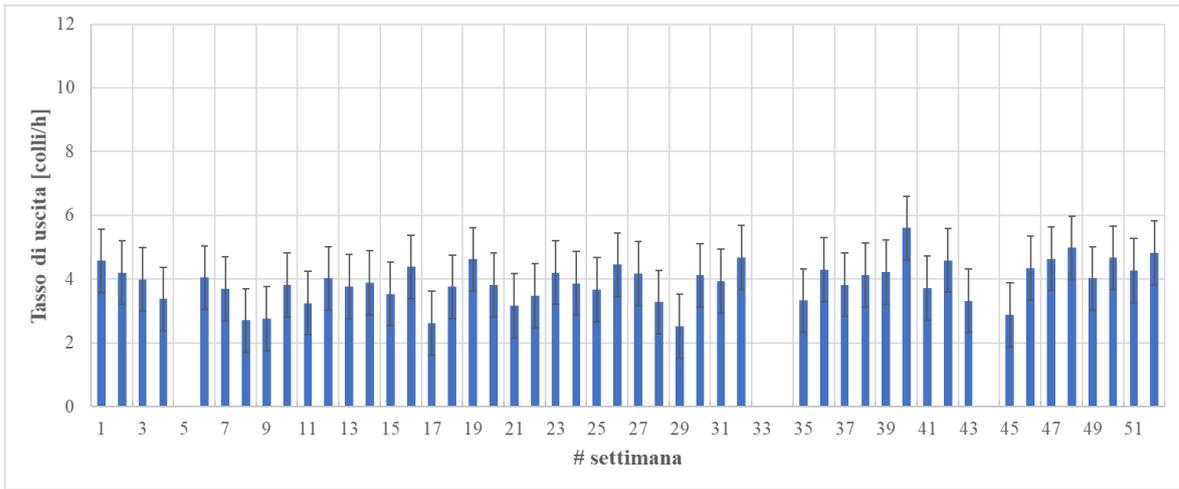


Figura 3.4 - Tassi medi di uscita della confezionatrice 3

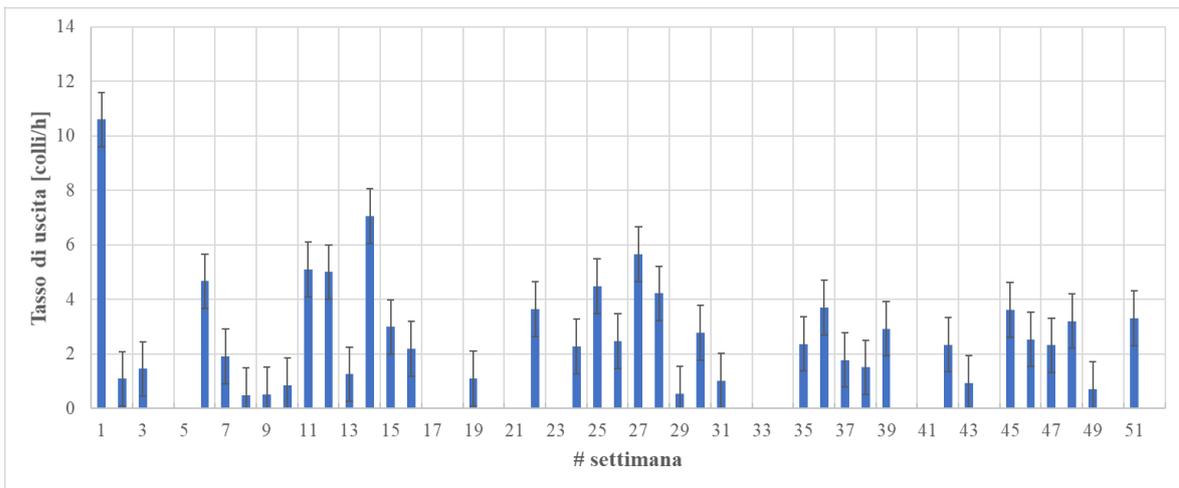


Figura 3.5 - Tassi medi di uscita della confezionatrice 4

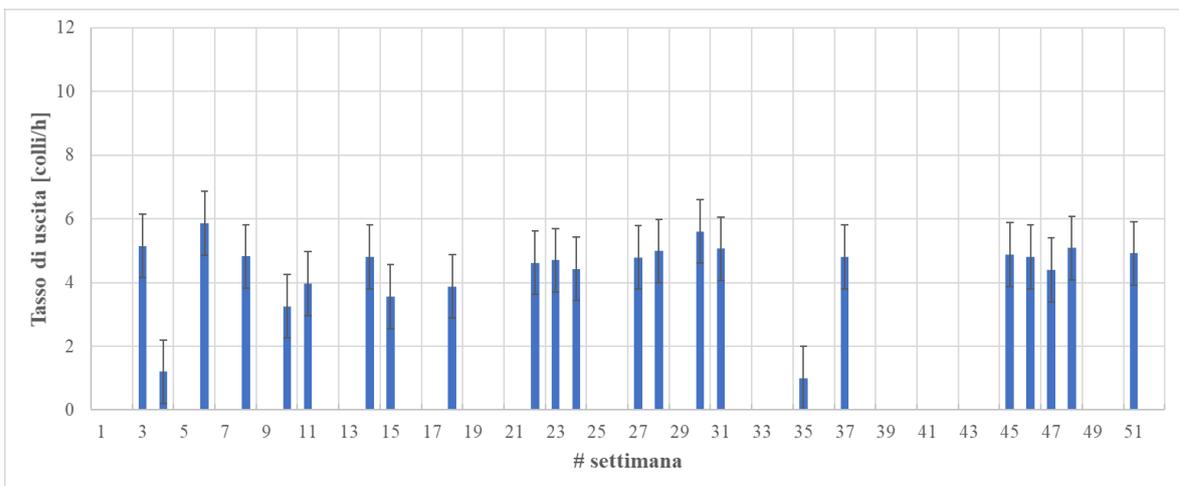


Figura 3.6 - Tassi medi di uscita della confezionatrice 5

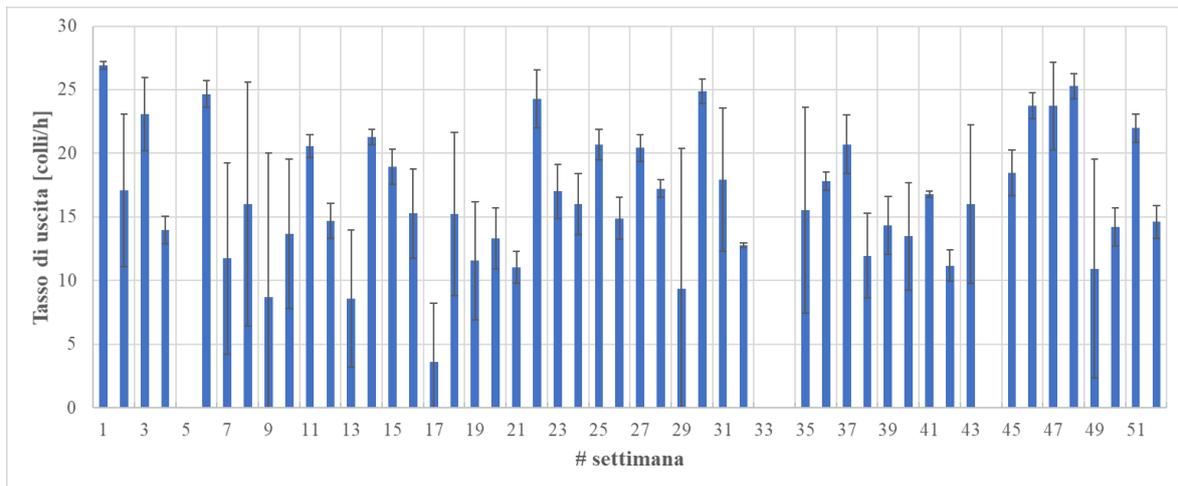


Figura 3.7 - Tasso medio di uscita dei lotti dal processo di confezionamento

Il processo trattato mostra una bassa variabilità che tende ad aumentare per bassi valori del tasso in uscita; si suppone che ciò avvenga perché la stazione è usata esclusivamente per gestire picchi locali di produzione.

Per valutare la quantità media di prodotti che dovevano essere immagazzinati, si è considerato il tasso medio di uscita dall'intero processo di confezionamento. Il risultato finale è rappresentato in figura 3.7.

3.4.3. *Composizione dei pallet*

Il sistema informativo tiene traccia dei colli presenti in ciascuno dei pallet che vengono lavorati. Tale numero è abbastanza variabile e può andare da 2 colli a 200.

Per individuare le composizioni più ricorrenti, si sono ordinate in modo crescente le frequenze relative ad ogni unità. Il 90% delle confezioni ingresso è costituito da 7 tipi di pallet e nelle analisi sono stati considerati rilevanti i pallet che contribuivano a formare il 99% del campione, come evidenziato in figura 3.8 e 3.9.

Numero di Colli	Numero Pallet Inferiori	Incidenza del numero di pallet sul totale	Valore cumulato
Colli x24	18878	35.2%	35.2%
Colli x60	10177	19.0%	54.1%
Colli x50	4803	8.9%	63.0%
Colli x72	4138	7.7%	70.8%
Colli x54	3870	7.2%	78.0%
Colli x18	3831	7.1%	85.1%
Colli x32	3474	6.5%	91.6%
Colli x42	1462	2.7%	94.3%
Colli x36	1231	2.3%	96.6%
Colli x100	518	1.0%	97.5%
Colli x110	384	0.7%	98.3%
Colli x90	299	0.6%	98.8%
Colli x120	250	0.5%	99.3%

Figura 3.8 - Composizione dei pallet equivalenti al 99% del campione

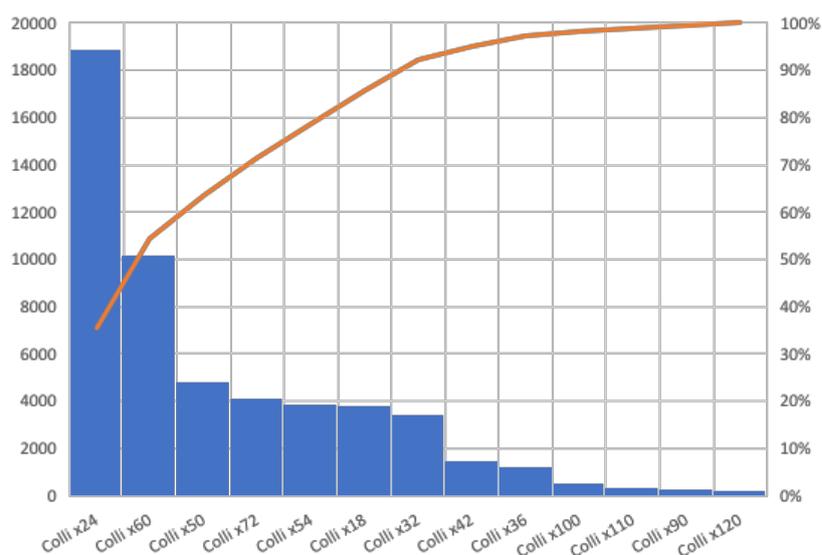


Figura 3.9 - Frequenza cumulata dei pacchi relativa alla composizione delle unità

3.5. *Analisi dei dati di vendita aziendali*

Oltre ai dati relativi alla produzione, sono stati raccolti i dati inerenti alle vendite del pastificio. Per uniformità con tutta l'analisi, sono stati considerati esclusivamente i dati

relativi al 2017. I dati relativi a questa parte sono aggregati e non vi sono differenze tra i colli singoli o colli doppi.

Per ottenere una stima dei colli movimentati, il numero di pallet è stato moltiplicato per la proporzione di pallet presenti in colli doppi rispetto ai pallet totali confezionati nel 2017.

In figura 3.10 è rappresentato il numero di colli (stimato) in uscita dall'azienda per ogni settimana. Si osserva che sono state effettuate delle consegne anche nelle settimane in cui la produzione era ferma.

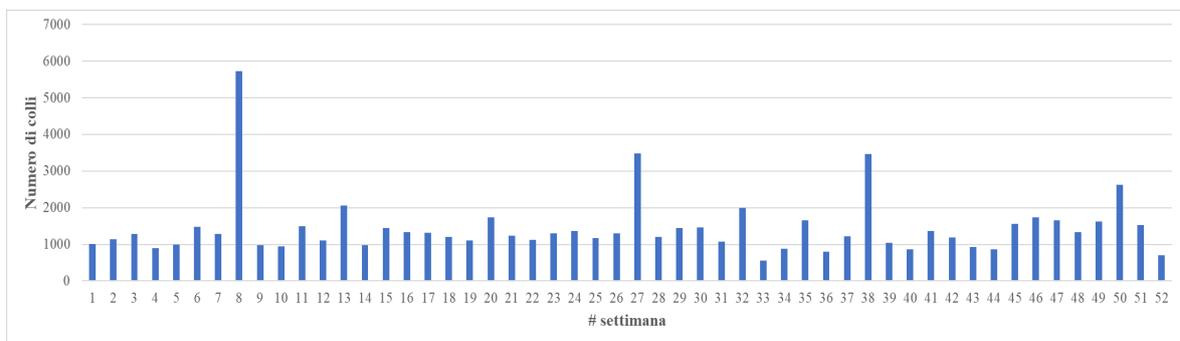


Figura 3.10 - Numero di colli stimati in uscita dall'azienda

3.6. *Analisi dei requisiti*

Dall'analisi dei dati in input è ora possibile definire dei requisiti del sistema di immagazzinamento:

- Le unità pallettizzate ed etichettate escono dal processo di confezionamento con grande variabilità. Ingressi di 20 colli all'ora garantiscono un funzionamento accettabile per questo magazzino, considerando la maggior parte delle settimane. Nelle settimane che presentano dei picchi di Udc da stoccare, occorrerebbe un throughput di 25 colli all'ora per garantire lo smaltimento delle operazioni;
- Tra la linea produttiva e l'ingresso nel magazzino rimane una movimentazione manuale dei colli. Per far sì che le analisi non subiscano importanti variazioni a causa di questi spostamenti, dovranno avere luogo ai ritmi imposti dal tasso di prodotti in uscita dalla linea;
- Anche i processi inerenti alle Udc in uscita dal magazzino destinate alla vendita sono altamente variabili. Di base un throughput di 10 colli all'ora permette di completare

in modo efficiente le operazioni in uscita. In alcune settimane però questo valore aumenta fino ad arrivare ad un valore di 35 colli all'ora.

Nel grafico in figura 3.11 è rappresentato il throughput medio necessario a completare le operazioni in ingresso ed uscita dal magazzino analizzato. Ad eccezione di alcuni picchi presenti in determinate settimane, un sistema capace di completare mediamente 35 cicli doppi all'ora permette di soddisfare le esigenze di 50 settimane su 52 annuali (il 96.15%).

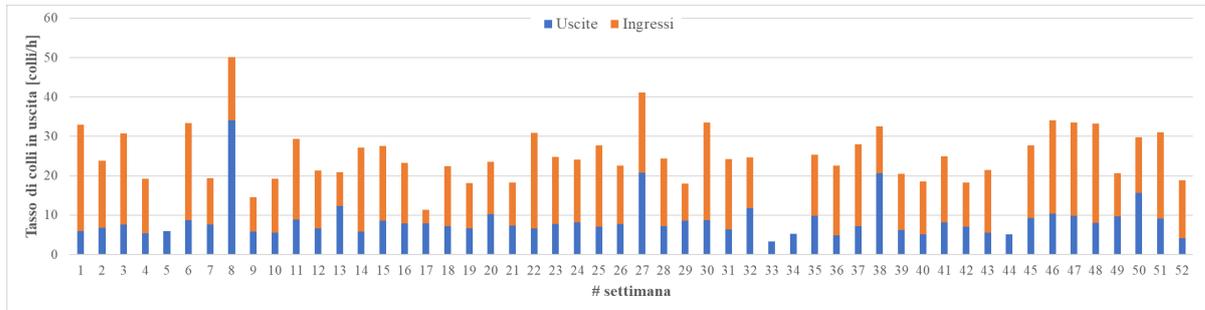


Figura 3.11 - Tasso medio di colli in ingresso e uscita nel magazzino in 52 settimane

3.7. Piano sperimentale

Analizzati i dati aziendali e potendo usufruire dei dati in input, è stato un piano sperimentale con cui valutare la risposta di un AVS/RS in molteplici scenari.

I fattori che sono stati variati durante le simulazioni sono 4:

- criterio di stoccaggio nel magazzino;
- fill rate del deposito ovvero la sua percentuale di riempimento all'inizio della simulazione;
- dimensione della flotta;
- production rate ovvero le frequenze alle quali sono definite le richieste di stoccaggio e di prelievo di una Udc [tabella 3.1].

Ogni scenario è stato ripetuto 3 volte per poter valutare la ripetibilità del sistema, ottenendo un totale di 243 simulazioni.

L'inizializzazione del magazzino è stata effettuata tenendo conto del fill rate da osservare: per ciascun valore del tasso di riempimento è stata costruita una disposizione casuale all'interno del magazzino di un numero appropriato di Udc. La stessa condizione iniziale è stata usata, quindi, per osservare l'incidenza degli scenari di produttività, delle diverse logiche di utilizzo, della numerosità della flotta, della ripetibilità del sistema.

Le misure di performance osservate sono principalmente di tre tipi:

- Throughput medio del sistema, misurato in Udc per ora di servizio, sia per le richieste di stoccaggio che per quelle di prelievo;
- Tempi medi di viaggio e di attesa per le Udc in stoccaggio e in prelievo;
- Livello complessivo di servizio del sistema.

Per ognuna di esse, di seguito saranno presentate:

- un'analisi descrittiva dei dati effettuata tramite boxplot per osservarne la distribuzione, identificare eventuali anomalie e individuare qualitativamente i fattori studiati che maggiormente impattano la performance del sistema;
- un'analisi della varianza che ha permesso di individuare quantitativamente i fattori che hanno un impatto significativo sulle misure di performance considerate.

In questi test saranno etichettati come significativi tutti quei valori che presenteranno un *p-value* minore od uguale al 5%.

Sarà anche valutato il valore del coefficiente di determinazione ($R\text{-sq}(\text{pred})$) che rappresenta la proporzione tra la variabilità dei dati e la correttezza del modello statistico utilizzato e misura la frazione della varianza della variabile dipendente espressa dalla regressione lineare. A questo potrà essere affiancata una stima del valore del coefficiente di determinazione "aggiustato" ($R\text{-sq}(\text{adj})$) che, diversamente dal primo, viene considerato per l'analisi della regressione lineare multipla.

Fattore	Valori	Numerazione
Criterio di Stoccaggio	Closest Channel (CC)	1
	Closest Floor (CF)	2
	Random	3
Fill Rate	40%	1
	60%	2
	80%	3
Dimensione della Flotta	1 shuttle e satellite	1
	2 shuttle e satelliti	2
	3 shuttle e satelliti	3
Tempo di inter-arrivo di richieste al magazzino	Storage: Media 147s, Dev. St. 15s; Retrieval: Media 147s, Dev. St. 147s	1
	Storage: Media 179s, Dev. St. 18s; Retrieval: Media 179s, Dev. St. 179s	2
	Storage: Media 233s, Dev. St. 23s; Retrieval: Media 233s, Dev. St. 233s	3

Tabella 3.1 - Valori dei fattori variati nelle simulazioni e relativa numerazione

3.7.1. *Throughput degli ingressi nel magazzino*

Il primo fattore analizzato è stato il throughput relativo agli ingressi nel magazzino automatizzato.

Come evidenziato dai boxplot in figura 3.12, si può affermare che il modello simulato presenta nella maggior parte dei casi un valore medio compreso fra 14 e 17 Udc stoccate nell'ora. La variabilità della performance può variare con il fill rate, ma si osservano variazioni apprezzabili anche dei valori medi dovuti alla dimensione della flotta e alla produttività dell'impianto.

In tutti e 4 i casi raffigurati si può notare che la dispersione della distribuzione non risulta molto ampia e, ad eccezione del confronto con il criterio di stoccaggio, presentano una distribuzione simmetrica [figura 3.13].

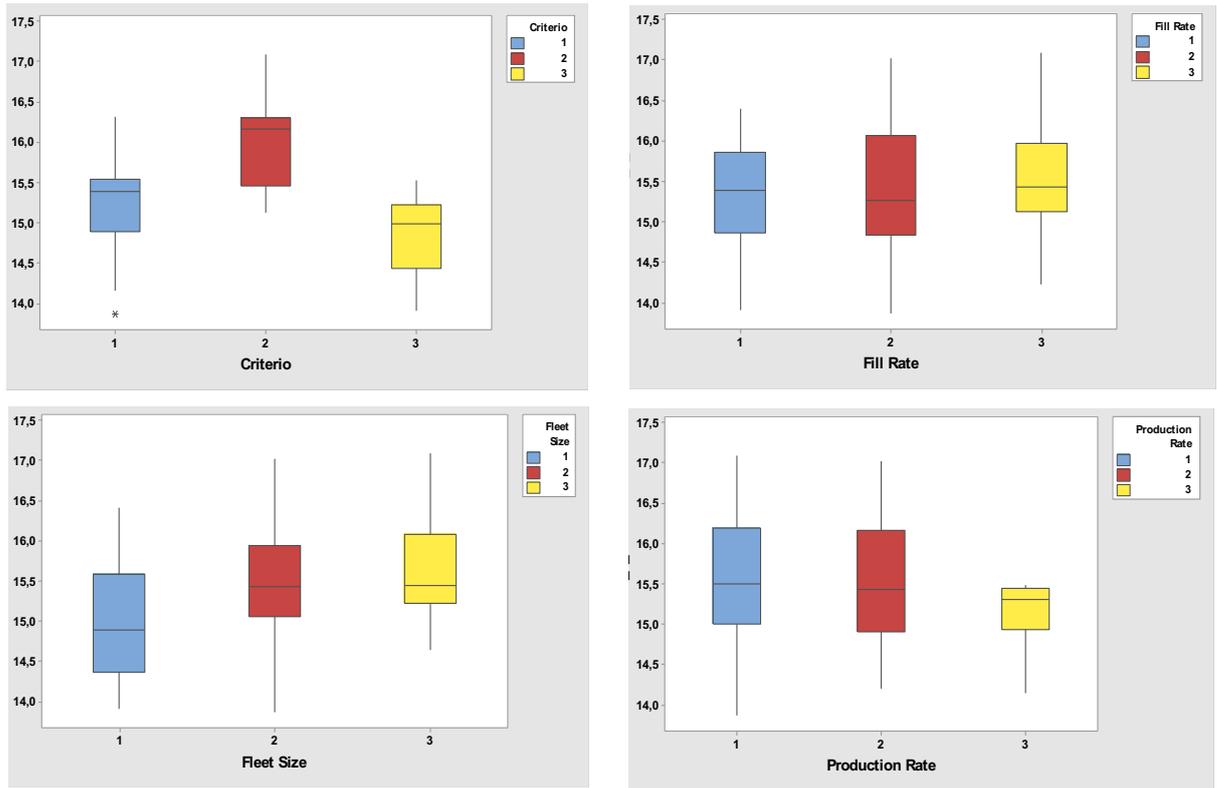


Figura 3.12 - Boxplot del throughput relativo alle Udc in ingresso in magazzino

Tramite l'analisi della varianza si è approfondita questa prima analisi andando a ricercare quei fattori significativi che potessero avere un impatto determinante sugli altri:

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Criterio	2	56,410	28,2051	366,37	0,000
Fill Rate	2	1,263	0,6317	8,21	0,000
Fleet Size	2	13,247	6,6236	86,04	0,000
Production Rate	2	7,189	3,5947	46,69	0,000
Criterio*Fill Rate	4	2,202	0,5504	7,15	0,000
Criterio*Fleet Size	4	4,861	1,2153	15,79	0,000
Criterio*Production Rate	4	6,858	1,7144	22,27	0,000
Fill Rate*Fleet Size	4	0,858	0,2146	2,79	0,028
Fill Rate*Production Rate	4	0,369	0,0922	1,20	0,313
Fleet Size*Production Rate	4	0,680	0,1701	2,21	0,069
Error	210	16,167	0,0770		
Lack-of-Fit	48	4,253	0,0886	1,20	0,196
Pure Error	162	11,913	0,0735		
Total	242	110,105			

L'analisi della varianza effettuata con questi fattori è in grado di giustificare circa l'80% della variabilità dei dati.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,277461	85,32%	83,08%	80,34%

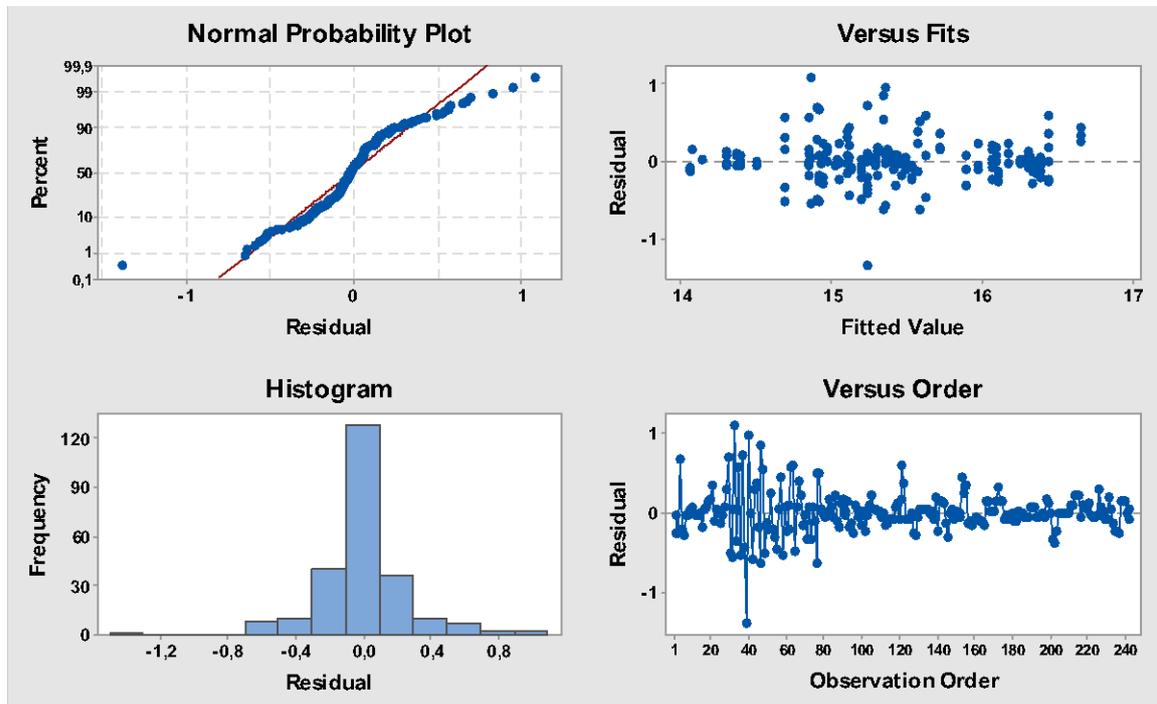


Figura 3.13 – Residual Plot relativo al throughput in ingresso

I valori che sono stati evidenziati sono quelli più significativi e, come si può notare, tutte le 4 variabili considerate hanno impatto nei risultati delle analisi ed anche l'interazione della variabile criterio con le altre è quella che più influenza i risultati dell'analisi.

In figura 3.14, il main effects plot evidenzia come ad influenzare maggiormente il throughput in ingresso sia proprio la scelta del criterio di stoccaggio mentre il fill rate è il fattore meno determinante sugli output. Questo è validato dall'interactions plot in cui i grafici relativi al criterio e alle interazioni con gli altri fattori presentano segmenti tra loro non paralleli.

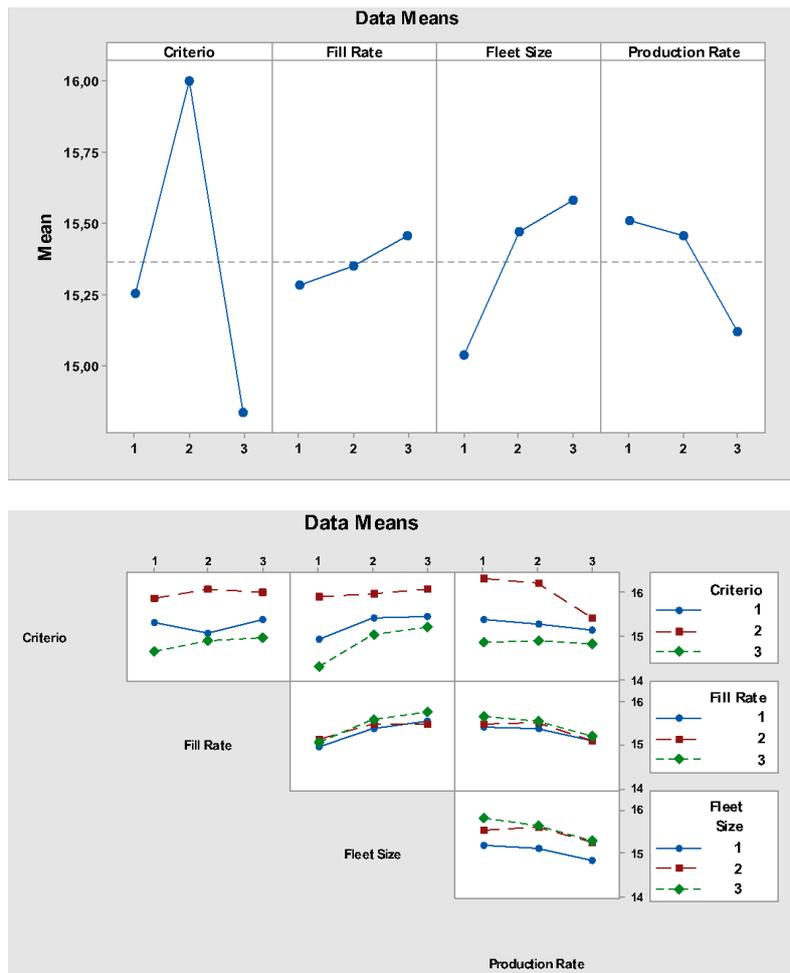


Figura 3.14 - Main Effects Plot ed Interactions Plot relativi al throughput in ingresso

3.7.2. *Throughput delle uscite dal magazzino*

Similmente all'analisi effettuata nel paragrafo precedente, è stata effettuata quella inerente alle Udc uscite dal magazzino automatico.

I boxplot di figura 3.15 evidenziano che il throughput in uscita dal magazzino è pari a circa 15 Udc all'ora. Tutte le simulazioni in tutti gli scenari presentano tale valore, ad eccezione del rapporto tra il throughput e la scelta del criterio di stoccaggio: anche in questo caso il valore medio tende ad aumentare per arrivare circa a 16 colli all'ora.

La dispersione della distribuzione risulta simmetrica anche in questa situazione in cui sono presenti degli outlier che però sono in numero esiguo per poter influenzare in modo determinante i risultati [figura 3.16].

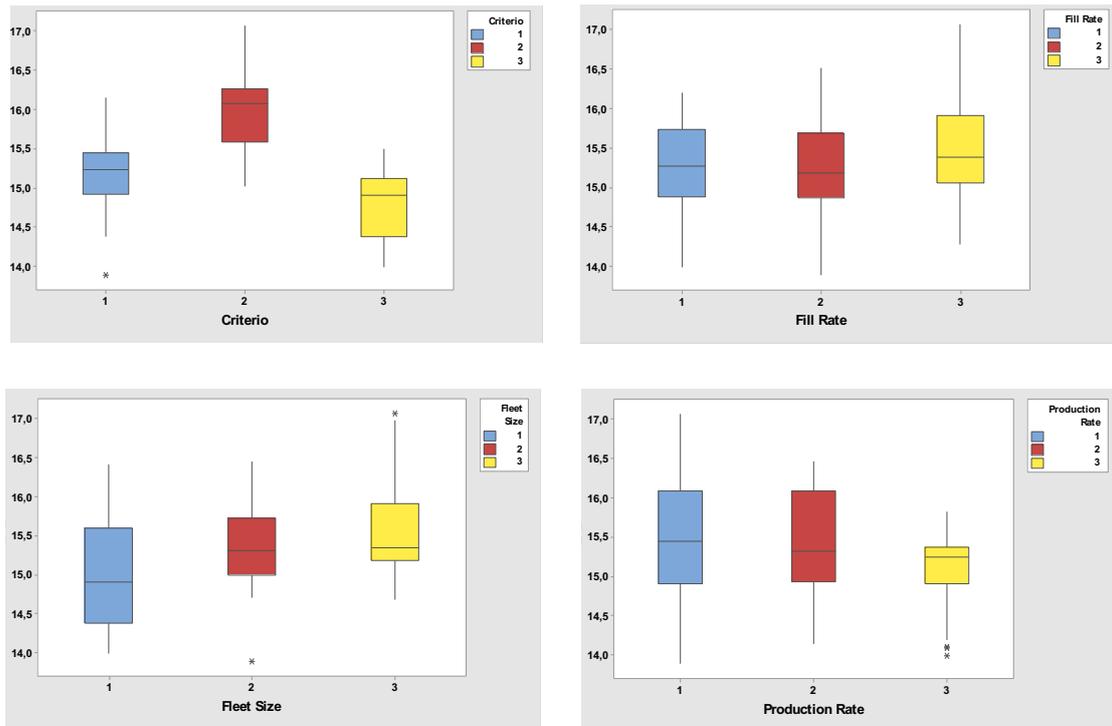


Figura 3.15 - Boxplot del throughput relativo alle Udc in uscita dal magazzino

L'ANOVA evidenzia come anche in questa situazione la scelta del criterio di stoccaggio influenzi in maniera determinante gli output e che le interazioni tra i vari fattori non sono significative se non correlate con il criterio, ad eccezione del confronto tra la dimensione della flotta ed il tasso di produzione.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Criterio	2	55,896	27,9478	452,39	0,000
Fill Rate	2	2,383	1,1917	19,29	0,000
Fleet Size	2	11,080	5,5399	89,67	0,000
Production Rate	2	5,289	2,6443	42,80	0,000
Criterio*Fill Rate	4	0,678	0,1696	2,75	0,029
Criterio*Fleet Size	4	5,931	1,4826	24,00	0,000
Criterio*Production Rate	4	5,386	1,3464	21,79	0,000
Fill Rate*Fleet Size	4	0,224	0,0561	0,91	0,461
Fill Rate*Production Rate	4	0,137	0,0344	0,56	0,695
Fleet Size*Production Rate	4	0,693	0,1734	2,81	0,027
Error	210	12,973	0,0618		
Lack-of-Fit	48	3,791	0,0790	1,39	0,066
Pure Error	162	9,183	0,0567		
Total	242	100,670			

L'analisi della varianza è in grado di giustificare circa l'83% della variabilità dei dati.

S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
0,248551	87,11%	85,15%	82,74%

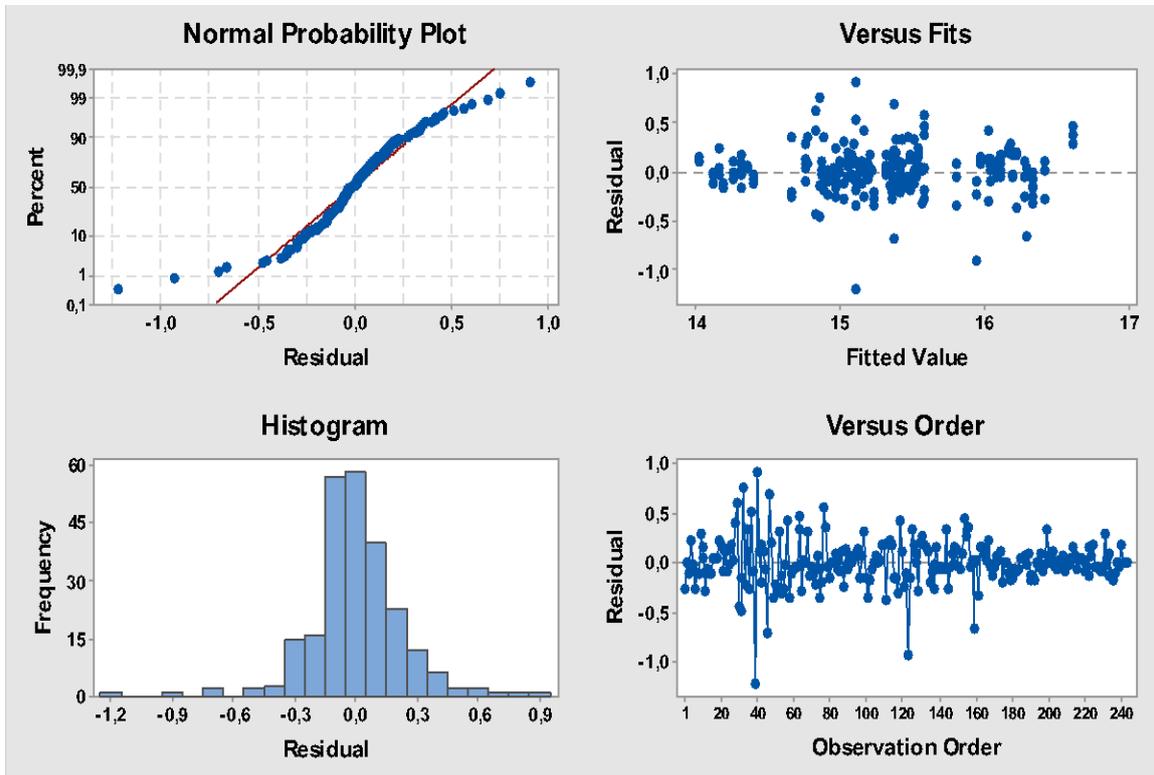


Figura 3.16 – Residual plot relativo al throughput in uscita

Dal main effects plot [figura 3.17] si evidenzia come sia proprio il cambiamento del criterio di stoccaggio, scegliendo specialmente il *closest floor*, a condizionare maggiormente i risultati dell'analisi. Dall'interactions plot si può vedere come i segmenti relativi alla scelta del criterio siano non paralleli tra loro, e quindi significativi ai fini dell'analisi, ed anche l'interazione tra la dimensione della flotta ed il tasso di inter-arrivo di una richiesta influisca sui valori in output.

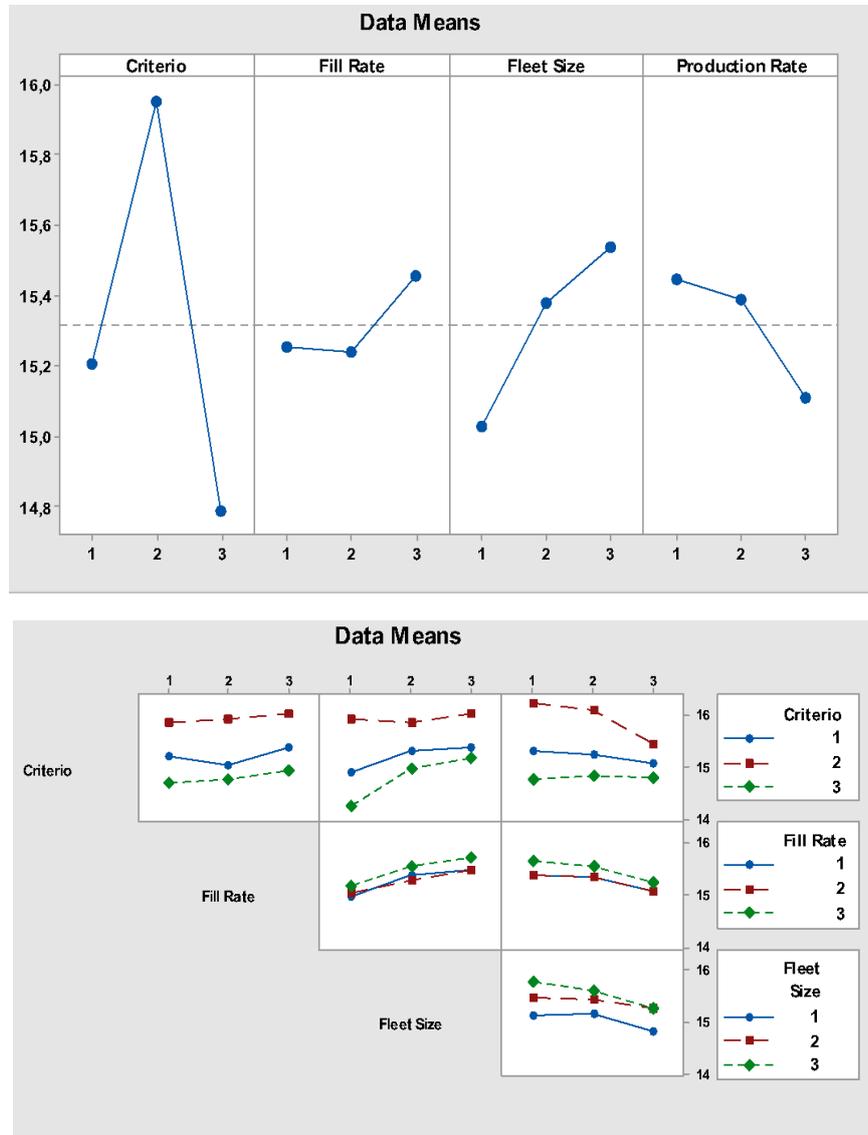


Figura 3.17 - Main Effects Plot e Interactions Plot relativi al throughput in uscita

3.7.3. *Cycle Time dello storage*

Il tempo ciclo relativo allo stoccaggio della Udc nel sistema è l'intervallo di tempo compreso tra la presa in carico dell'oggetto da parte del satellite ed il momento in cui questo è lasciato nel rack.

Come da figura 3.18, i boxplot evidenziano che nella maggior parte degli scenari il tempo di stoccaggio è compreso fra circa 60 e 80 secondi: non si apprezzano particolari variazioni dovute al variare del fill rate, della flotta di AVS/RS e della produttività dell'impianto; viceversa, si nota un netto contributo legato al criterio adottato per la scelta della posizione di stoccaggio.

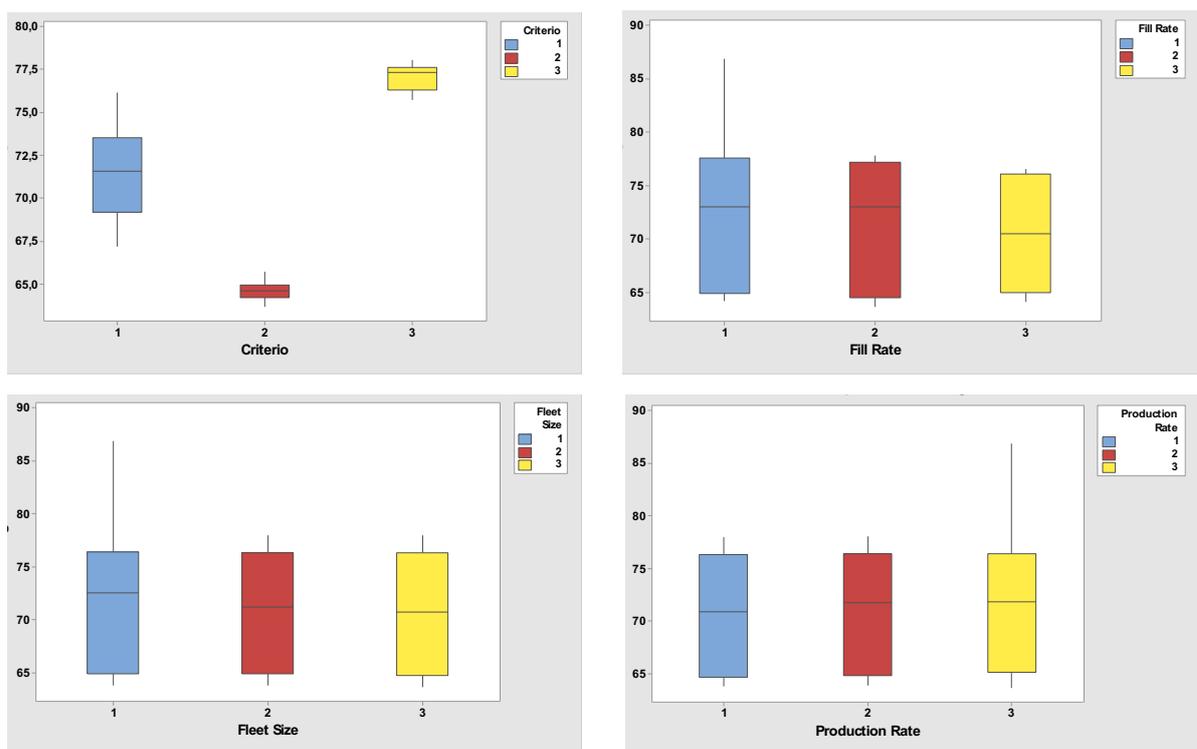


Figura 3.18 – Boxplot del cycle time relativo alle Udc in ingresso in magazzino

Differenze simili vi sono nella dispersione della distribuzione di ognuno dei valori: se il cycle time è rapportato con fill rate, numero della flotta e production rate la distribuzione risulta simmetrica anche se leggermente dispersa mentre se analizzato con il tipo di criterio di stoccaggio, tra le tre differenti situazioni vi è differenza sia di dispersione che di simmetria.

Dal test ANOVA è risaltato che i valori significativi nell'analisi siano la scelta del criterio ed il fill rate, tutti gli altri non hanno un impatto così determinante sui risultati. Va

sottolineato come però l'interazione tra fleet size e production rate sia proprio al limite della non significatività.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Criterio	2	5859,79	2929,89	749,62	0,000
Fill Rate	2	80,14	40,07	10,25	0,000
Fleet Size	2	10,90	5,45	1,39	0,250
Production Rate	2	13,47	6,73	1,72	0,181
Criterio*Fill Rate	4	21,78	5,44	1,39	0,238
Criterio*Fleet Size	4	10,02	2,51	0,64	0,634
Criterio*Production Rate	4	8,73	2,18	0,56	0,693
Fill Rate*Fleet Size	4	22,90	5,73	1,46	0,214
Fill Rate*Production Rate	4	14,48	3,62	0,93	0,450
Fleet Size*Production Rate	4	35,17	8,79	2,25	0,065
Error	210	820,78	3,91		
Lack-of-Fit	48	223,31	4,65	1,26	0,145
Pure Error	162	597,47	3,69		
Total	242	6898,16			

Anche in questo caso, il risultato dell'ANOVA si mostra completo: il modello giustifica circa l'84% della variabilità dei dati.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,97699	88,10%	86,29%	84,07%

Dal grafico in figura 3.19 si può evincere come ci siano alcuni outlier che influenzano leggermente i risultati dell'analisi, ma che l'andamento dei residui e la dispersione della distribuzione sia comunque simile in tutti i casi.

Il main effects plot [figura 3.20] conferma graficamente che la scelta del criterio di stoccaggio sia ciò che più incide sul valore del cycle time. L'interactions plot conferma questa analisi ed inoltre mostra graficamente come i segmenti della dimensione della flotta ed il tasso delle richieste di Udc in uscita abbiano una lieve interazione, non tale però da poter essere considerata significativa.

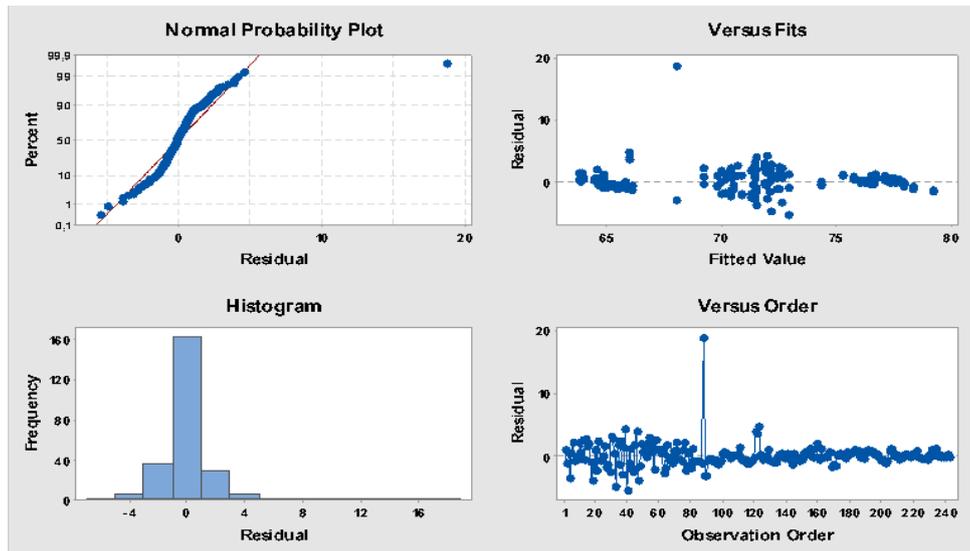


Figura 3.19 - Residual plot relativo al ciclo time dello stoccaggio

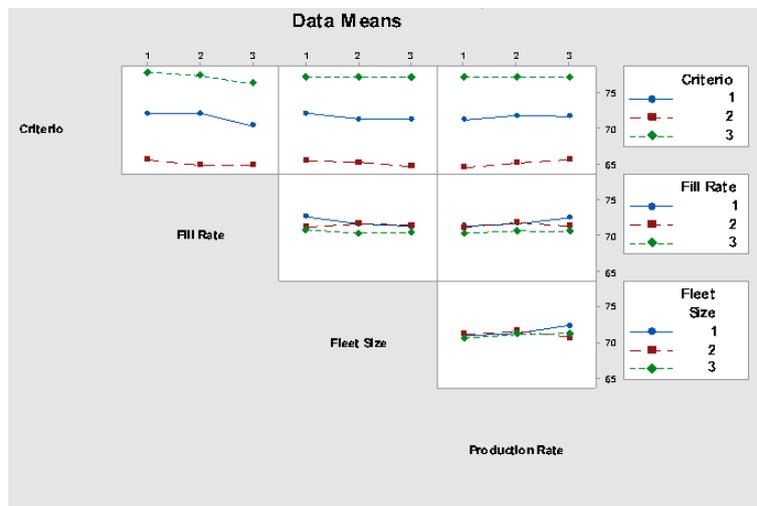
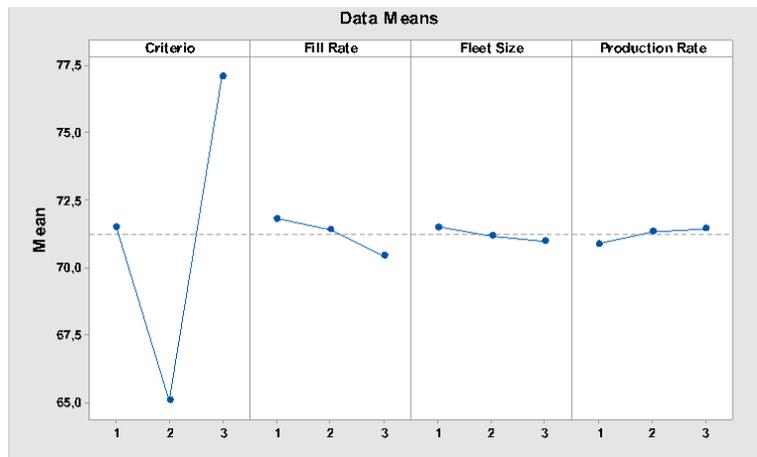


Figura 3.20 - Main Effects Plot ed Interactions Plot relativo al CT dello storage

3.7.4. *Cycle Time del retrieval*

Situazione molto simile a quella del tempo ciclo relativo ad Udc in entrata nel magazzino è quella inerente al tempo di uscita di un item: il valore è calcolato da quando il satellite carica l'Udc fino a quando la scarica fuori dal deposito.

Anche in questo caso il criterio di stoccaggio presenta nel boxplot valori che differiscono molto tra di loro nei vari scenari e soprattutto delle distribuzioni non ben definite. Nel caso di criterio *closest floor* sono presenti degli outlier che però si conformano al valore medio delle altre valutazioni. Questo, più evidente dai boxplot raffiguranti gli altri confronti, è di circa 73 secondi per ogni Udc (valore sull'asse delle ordinate). Le distribuzioni sono contraddistinte da una buona simmetria caratterizzata però da una grande dispersione [figura 3.21].

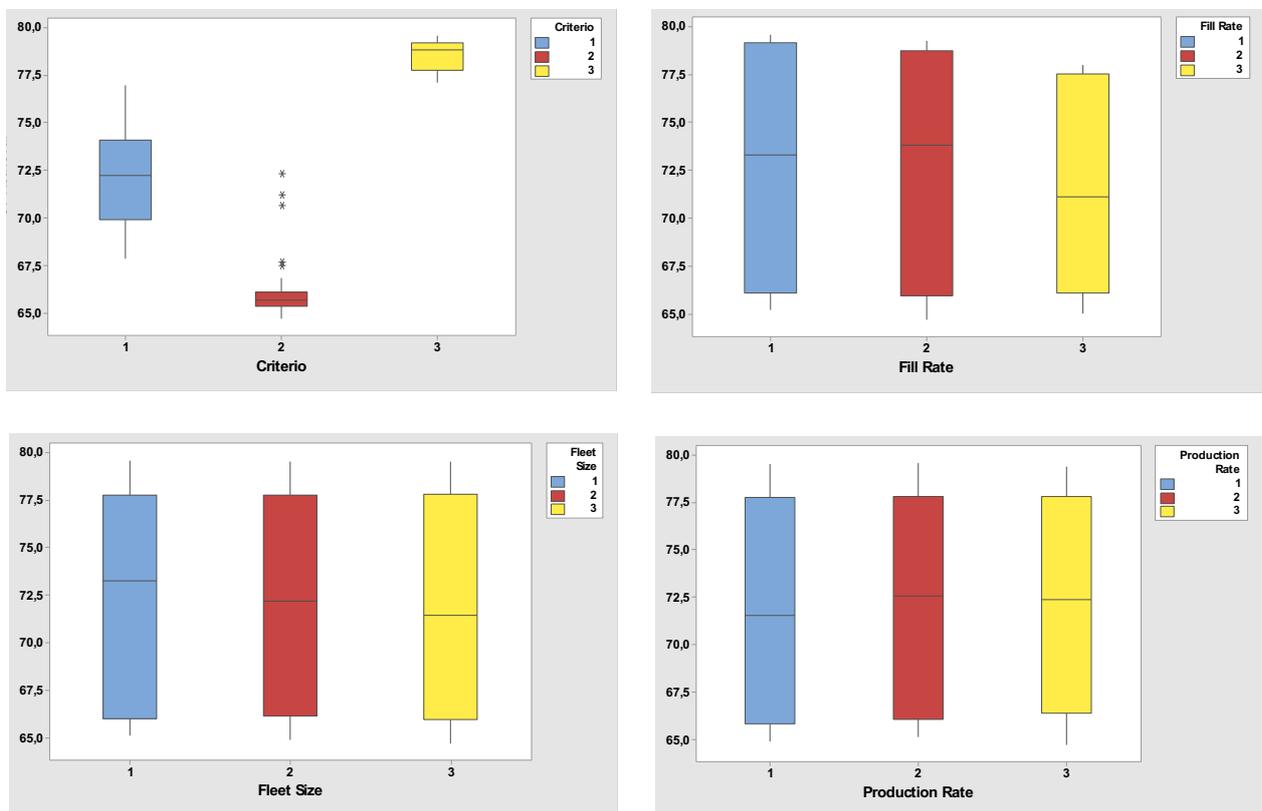


Figura 3.21 - Boxplot del cycle time relativo alle Udc in uscita dal magazzino

Per il cycle time relativo alle uscite dal magazzino il test ANOVA riesce a spiegare bene quasi il 92% dei valori dati in input; inoltre mette in risalto che oltre alla scelta del criterio ed il riempimento iniziale del magazzino anche la loro interazione è significativa.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Criterion	2	6466,17	3233,08	1526,67	0,000
Fill Rate	2	58,79	29,40	13,88	0,000
Fleet Size	2	3,69	1,85	0,87	0,420
Production Rate	2	8,77	4,39	2,07	0,129
Criterion*Fill Rate	4	30,66	7,67	3,62	0,007
Criterion*Fleet Size	4	15,92	3,98	1,88	0,115
Criterion*Production Rate	4	4,74	1,19	0,56	0,692
Fill Rate*Fleet Size	4	8,76	2,19	1,03	0,390
Fill Rate*Production Rate	4	2,48	0,62	0,29	0,883
Fleet Size*Production Rate	4	15,11	3,78	1,78	0,133
Error	210	444,72	2,12		
Lack-of-Fit	48	142,75	2,97	1,60	0,017
Pure Error	162	301,98	1,86		
Total	242	7059,82			

In questo caso l' R^2 spiega più del 91% della variabilità dei dati e l' R^2 aggiustato quasi il 93%. Si può dedurre che i regressori spiegano in modo quasi del tutto corretto il valore della variabile dipendente esaminata.

S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
1,45524	93,70%	92,74%	91,57%

3.7.5. *Cycle Time di attesa in fase di stoccaggio*

I boxplot di figura 3.22 evidenziano come il tempo ciclo di un item che aspetta l'arrivo del satellite per poter essere caricato e portato nel rack sia compreso in un range che varia tra i 43 ed i 48 secondi. Tranne nella situazione in cui si sceglie il criterio random per lo stoccaggio, le dispersioni delle distribuzioni sono abbastanza contenute e tutte vicine il valore mediano.

Nei 4 casi raffigurati gli scenari variano leggermente tra di loro, influenzati in alcuni casi dalla presenza di pochi outlier.

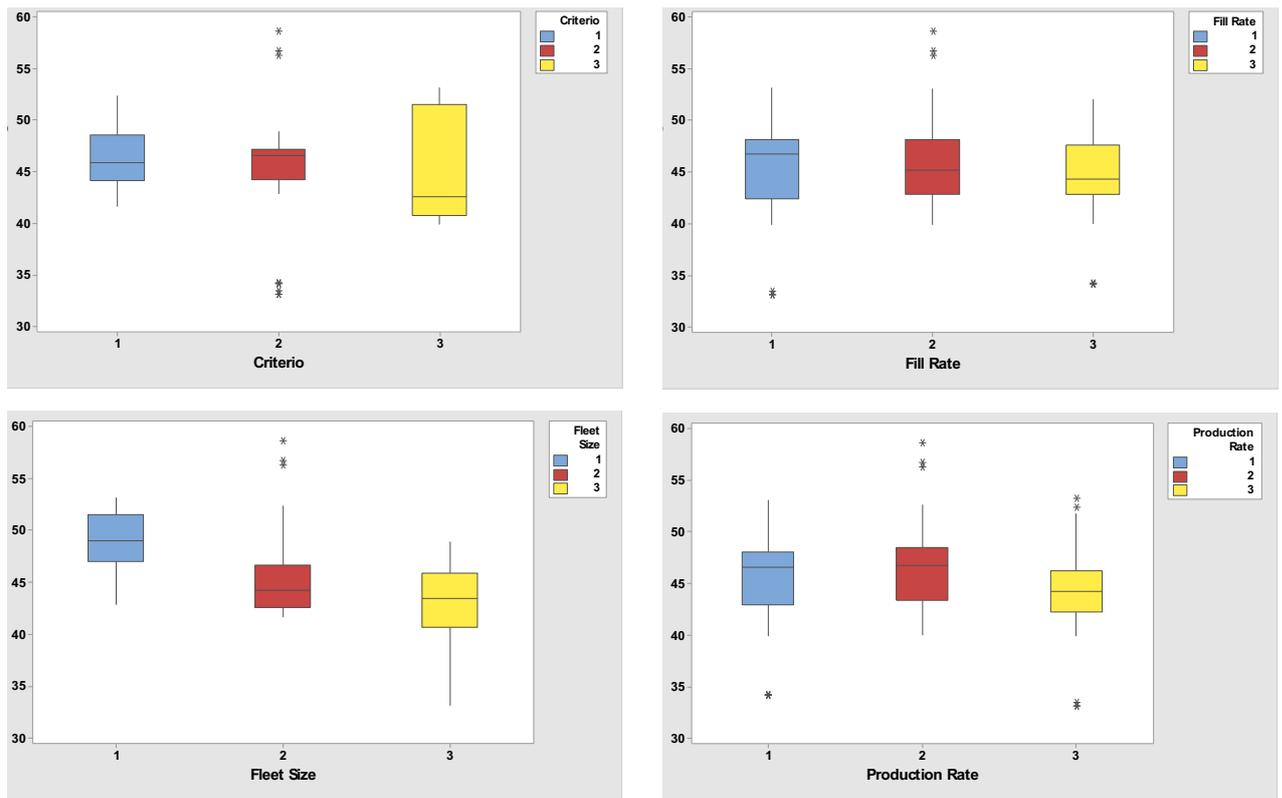


Figura 3.22 - Boxplot del tempo ciclo relativo alle Udc in attesa di essere stoccate

Dall'analisi della varianza risulta che quasi tutte le interazioni sono significative. Il test stesso giustifica in modo quasi completo la variabilità dei dati: il valore del coefficiente di determinazione è quasi del 72%. Il grafico rappresentato in figura 3.23 rappresenta in modo esplicito questa analisi.

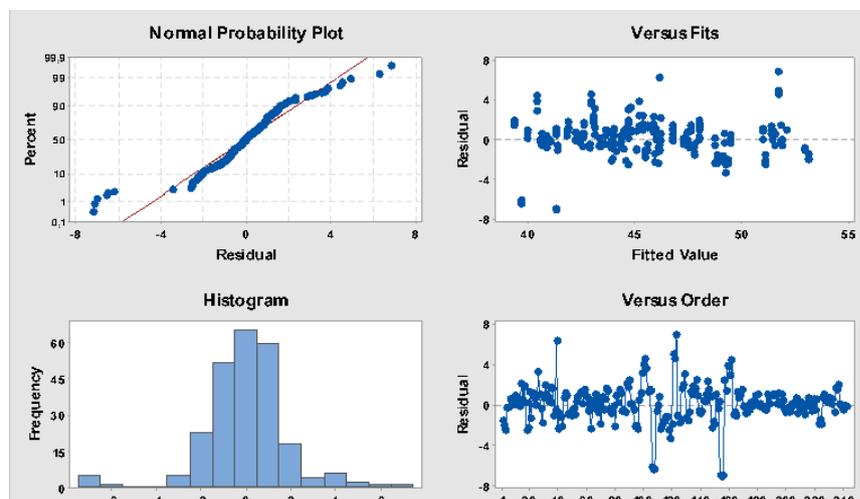


Figura 3.23 - Residual Plot relativo al CT degli item in attesa di stoccaggio

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Criterion	2	62,07	31,033	7,71	0,001
Fill Rate	2	53,72	26,862	6,67	0,002
Fleet Size	2	1564,28	782,140	194,23	0,000
Production Rate	2	156,20	78,102	19,40	0,000
Criterion*Fill Rate	4	65,68	16,421	4,08	0,003
Criterion*Fleet Size	4	937,08	234,270	58,18	0,000
Criterion*Production Rate	4	221,20	55,300	13,73	0,000
Fill Rate*Fleet Size	4	19,58	4,894	1,22	0,305
Fill Rate*Production Rate	4	42,87	10,716	2,66	0,034
Fleet Size*Production Rate	4	28,30	7,074	1,76	0,139
Error	210	845,63	4,027		
Lack-of-Fit	48	722,06	15,043	19,72	0,000
Pure Error	162	123,57	0,763		
Total	242	3996,61			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
2,00669	78,84%	75,62%	71,67%		

L'influenza dei vari fattori sulla variabile considerata è ben visibile dal main effects plot di figura 3.24 in cui risalta subito come il cambiamento più significativo si abbia nella scelta del numero della flotta.

I risultati del test ANOVA sono validati dall'interactions plot [figura 3.24]: il grafico mostra visivamente ciò che era già evidenziato dall'analisi della varianza. Si possono notare le sovrapposizioni tra i segmenti che definiscono una correlazione tra i fattori considerati più o meno forte.

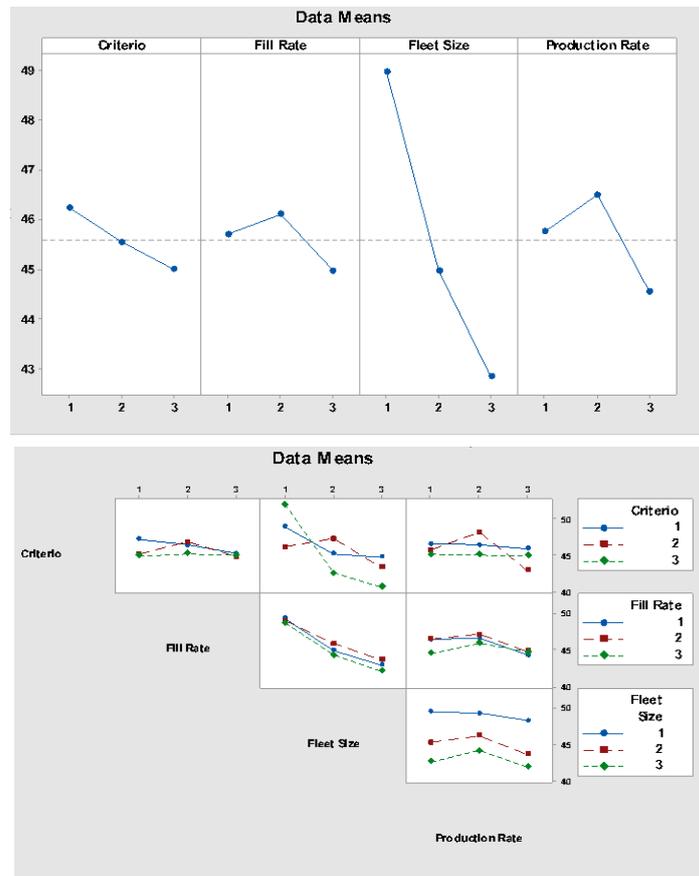


Figura 3.24 - Main Effects Plot e Interactions Plot relativa al CT di attesa in fase di stoccaggio

3.7.6. *Cycle time di attesa nel caso di retrieval*

Questa analisi si concentra sul tempo ciclo impiegato da una Udc da quando parte la richiesta di prelievo finchè non viene materialmente prelevata dal satellite dalla sua posizione nel rack.

Come visibile dai boxplot [figura 3.25] i valori medi di questa analisi risultano trovarsi nel range tra 2000 e 2200 secondi e presentano diversi outlier molto più elevati rispetto questi valori mediani. In tutti i grafici comunque la dispersione della distribuzione risulta contenuta ed è anche rispettata la simmetria della distribuzione stessa.

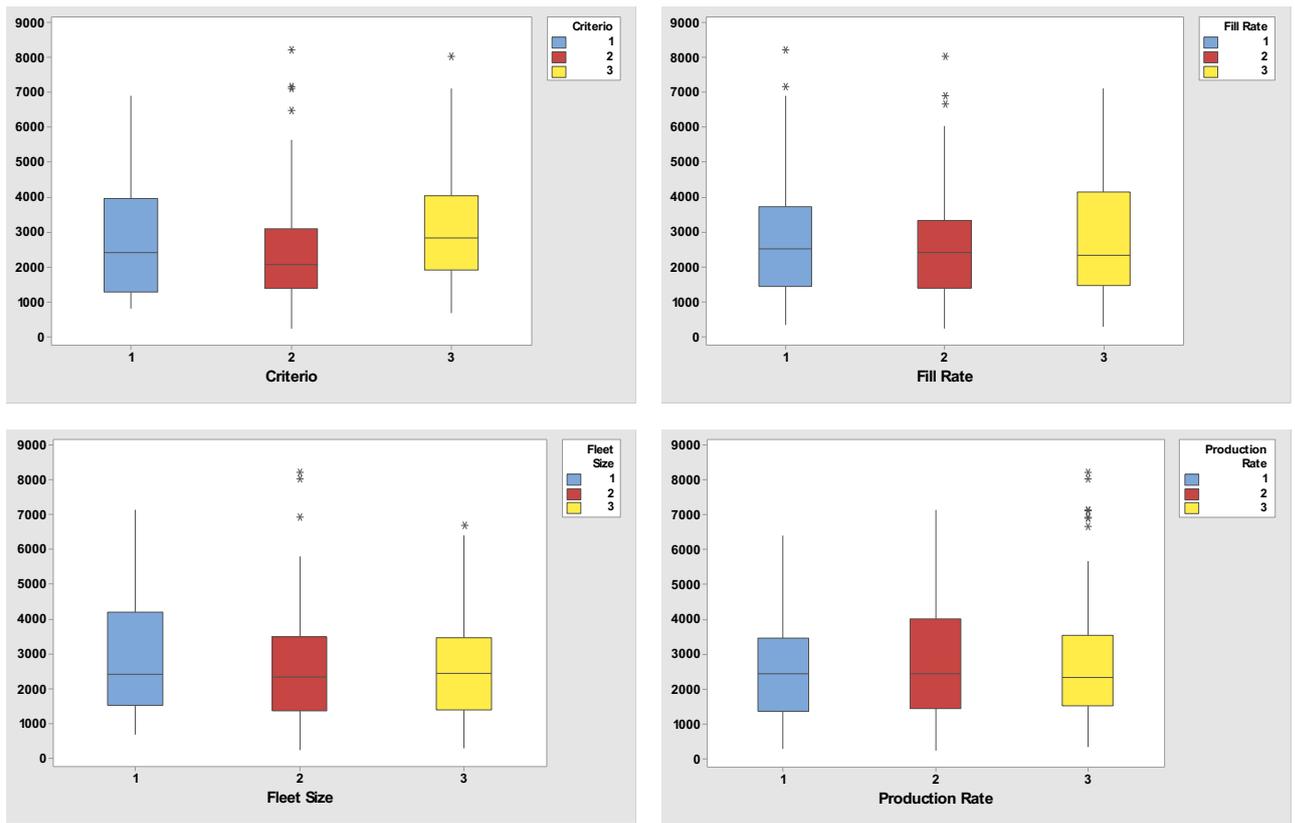


Figura 3.25- Boxplot del tempo ciclo relativo alle Udc in attesa di essere riprese

Anche l'ANOVA inerente a questa variabile risulta particolarmente non significativa nei valori in output che calcola, considerando che l'unico fattore che significativo è la scelta del criterio di stoccaggio. Dal residual plots [figura 3.26] si può notare una dispersione dei dati non proprio ottimale.

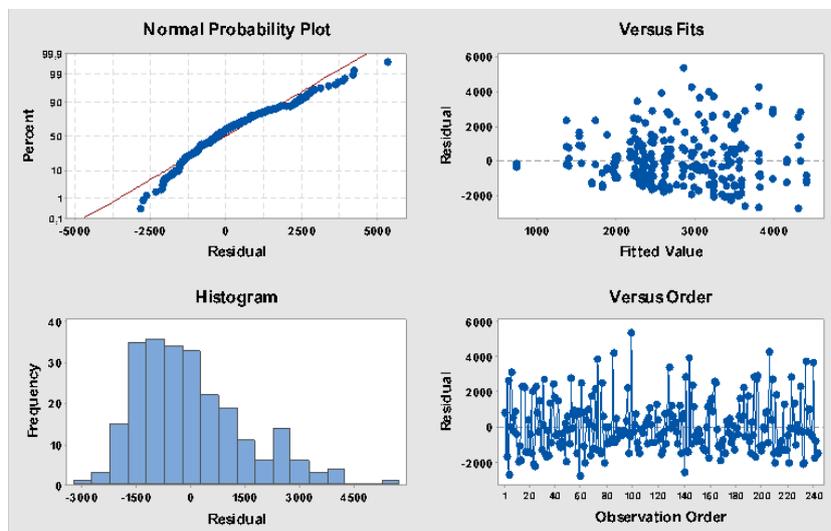


Figura 3.26 - Residual Plots del CT relativo alle Udc in attesa di essere riprese

Il main effects plot [figura 3.27] mostra come la scelta di uno qualsiasi dei 4 fattori considerati possa condizionare i risultati della variabile presa in esame. Similmente - nella stessa figura - l'interactions plot evidenzia come criterio di stoccaggio, fill rate, dimensione della flotta e tassi di inter-arrivo in ingresso al magazzino possano influenzarsi a vicenda.

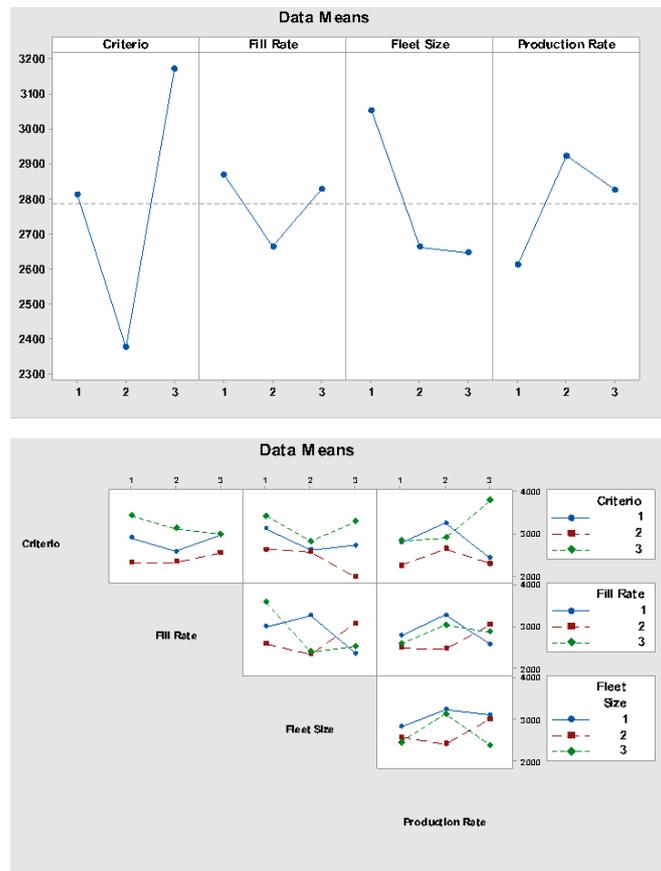


Figura 3.27 - Main Effects Plot e Interactions Plot del CT relativo alle Udc in attesa di ritiro

Per poter comprendere l'andamento particolare di questi dati è stata considerata, nel particolare, una singola simulazione ed analizzato il perché di questi output. È stato riscontrato che su un totale di 1408 Udc in ingresso, 1044 presentano un cycle time inferiore a 100 secondi e le restanti assumono valori molto più alti. In figura 3.28 è mostrato nella parte superiore l'andamento di tutta la simulazione considerando i valori cumulati sulle ordinate ed i secondi sulle ascisse, mentre in basso vi è un ingrandimento sul particolare "salto" che caratterizza i valori di questa analisi: risulta evidente come quasi il 75% delle Udc abbia un tempo ciclo di attesa in fase di ripresa che varia tra i 60 e gli 80 secondi.

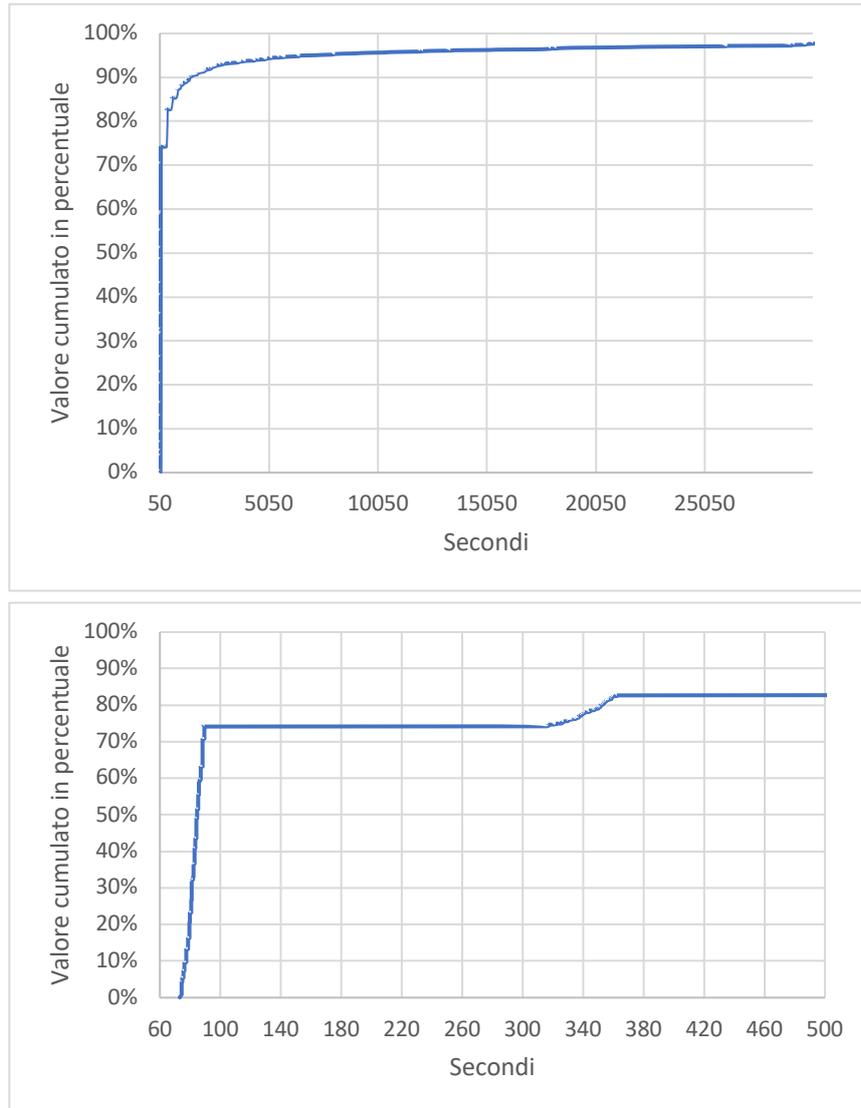


Figura 3.28 - Andamento dei valori del tempo di ciclo in fase di retrieval di una particolare simulazione

Si è poi passati ad una verifica su tutte le simulazioni, considerando solamente valori di tempo ciclo inferiori a 100 secondi. Dal grafico in figura 3.29 si nota come, vagliando questa l'ipotesi, la “nuvola di dati” che fa riferimento al tempo si addensi principalmente tra i 70 ed i 90 secondi.

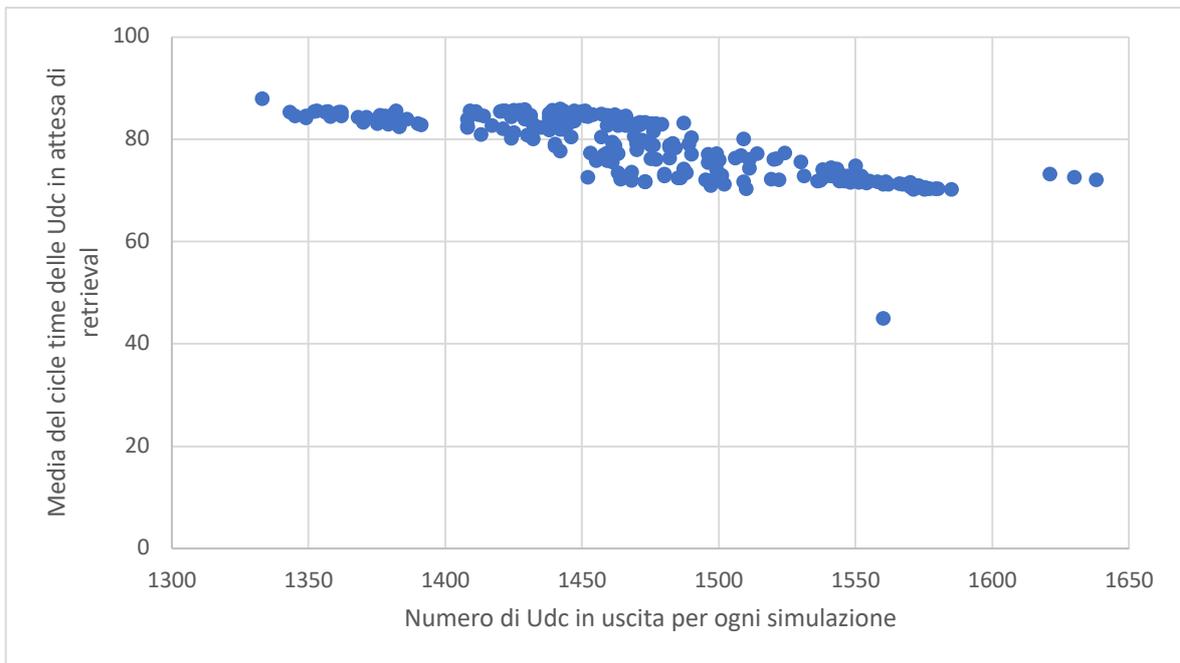


Figura 3.29 - Valori medi di tempo ciclo di tutte le simulazioni per Udc con CT inferiore a 100 secondi

3.7.7. Livello di servizio

Valutando questa variabile con il criterio di stoccaggio, il fill rate ed il numero dei veicoli, risulta che il livello di servizio medio sia intorno al 75% con una dispersione della distribuzione molto grande ed una distribuzione stessa non del tutto simmetrica [figura 3.30]. Diverso il caso del production rate che mostra medie molto diverse tra loro seppur con distribuzioni simili.

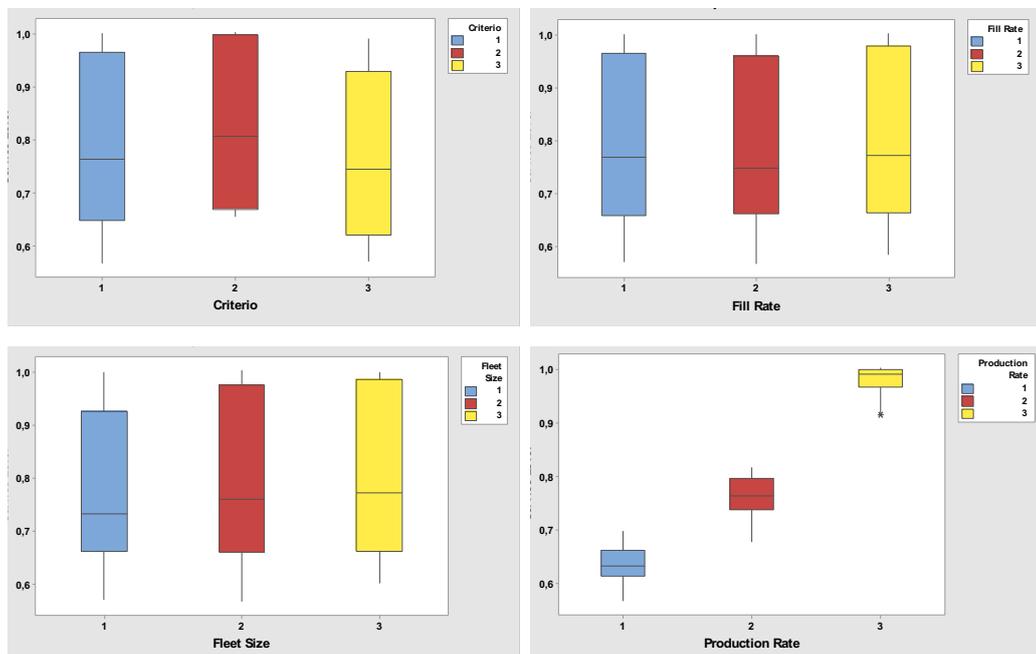


Figura 3.30 - Boxplot relativi al livello di servizio

Il test sulla varianza ritorna valori decisamente significativi, ad eccezione dell'interazione tra il fill rate ed il production rate. Inoltre, i regressori spiegano bene la variabile "livello di servizio" dato che il valore del coefficiente di determinazione è poco più del 98%.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Criterion	2	0,10607	0,05304	178,03	0,000
Fill Rate	2	0,00505	0,00253	8,48	0,000
Fleet Size	2	0,03004	0,01502	50,42	0,000
Production Rate	2	4,92349	2,46174	8263,34	0,000
Criterion*Fill Rate	4	0,00498	0,00124	4,18	0,003
Criterion*Fleet Size	4	0,02199	0,00550	18,46	0,000
Criterion*Production Rate	4	0,00387	0,00097	3,25	0,013
Fill Rate*Fleet Size	4	0,00414	0,00104	3,48	0,009
Fill Rate*Production Rate	4	0,00125	0,00031	1,05	0,381
Fleet Size*Production Rate	4	0,00316	0,00079	2,65	0,034
Error	210	0,06256	0,00030		
Lack-of-Fit	48	0,03499	0,00073	4,28	0,000
Pure Error	162	0,02757	0,00017		
Total	242	5,16661			

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0172601	98,79%	98,60%	98,38%

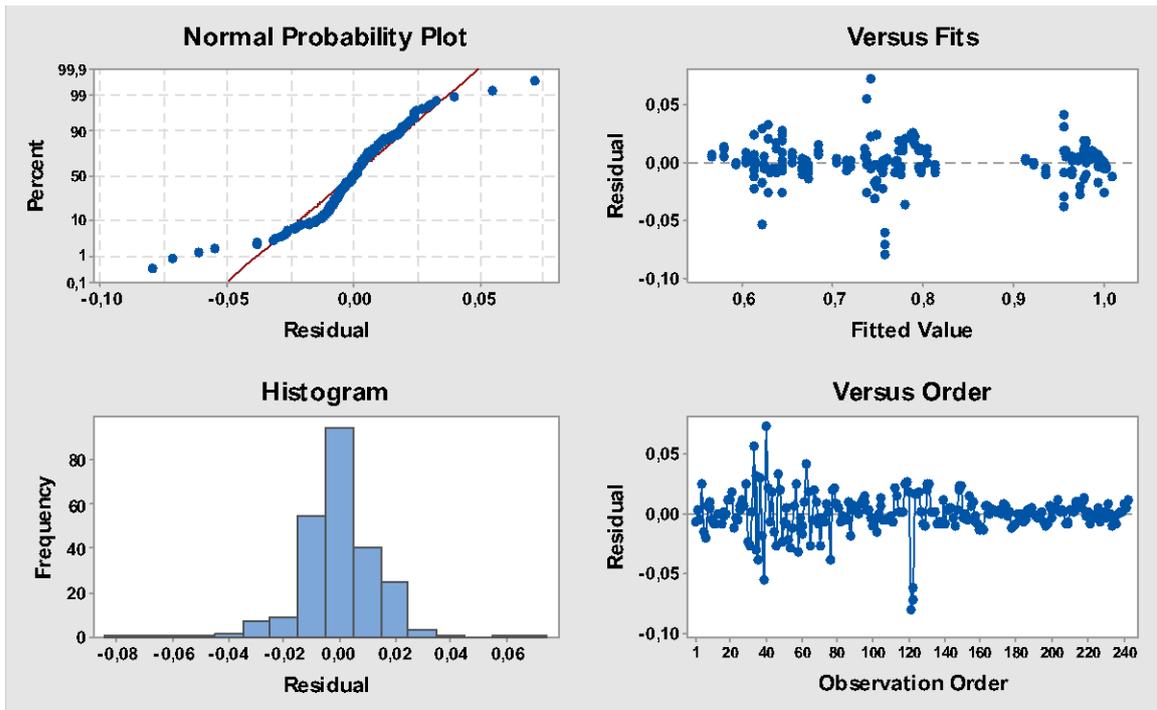


Figura 3.31 - Residual Plot del livello di servizio

Il grafico raffigurante il main effects plot [figura 3.32] evidenzia come la scelta del tasso degli inter-arrivi al magazzino sia quella più influente sul livello di servizio e come il valore

della variabile considerata sia più alto nel caso di scenario 3, ovvero quando gli inter-arrivi sono più dispersi nel tempo.

Dall'interactions plot [figura 3.32] si conferma quello che era stato predetto dall'ANOVA: tutti i fattori mostrano una elevata significatività quando rapportati tra di loro.

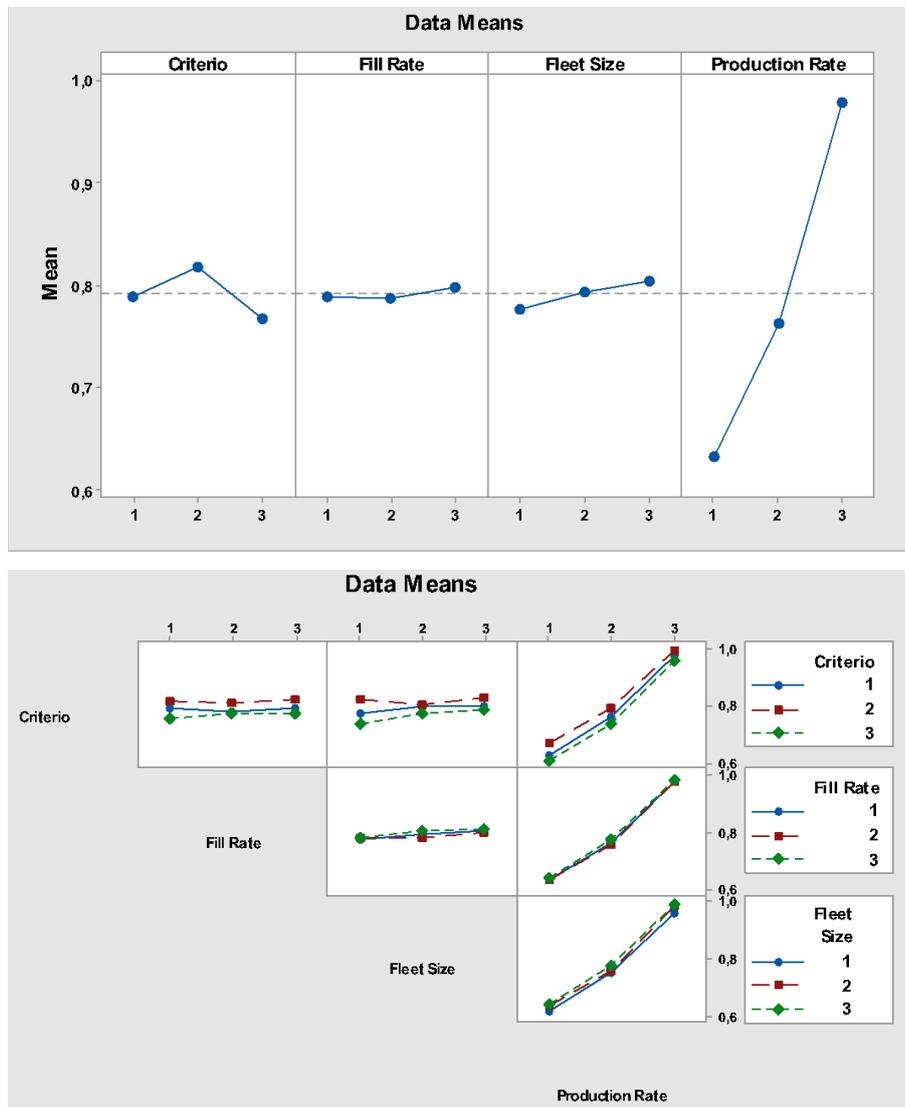


Figura 3.32- Main Effects Plot e Interactions Plot relativi al livello di servizio

Partendo dall'analisi di questa variabile si è andato a circoscrivere il campo d'azione, eseguendo nuovamente le valutazioni delle variabili precedentemente menzionate e considerando esclusivamente le simulazioni con un livello di servizio maggiore od uguale al 95%.

Considerando il vincolo imposto, di tutte le 243 simulazioni effettuate, ne sono state valutate solamente 68. Di queste si hanno scenari diversi per quanto riguarda la scelta del criterio di stoccaggio, del fill rate e del numero dei veicoli che compongono la flotta. Per quanto riguarda il production rate l'unico scenario che potesse soddisfare il vincolo è il numero 3, ovvero quello in cui gli inter-arrivi al magazzino automatizzato sono più dispersi nel tempo. Tenendo presente di questa situazione, non è stato dunque possibile valutare i dati in input tramite un test sulla varianza.

Throughput degli ingressi in magazzino. In figura 3.33 è rappresentato il boxplot del throughput valutato in base ai soli 3 fattori che si possono considerare. Si nota come il valore medio generale si aggiri intorno ai 15.3 – 15.4 pezzi all'ora. Le distribuzioni risultano molto diverse se considerate nello stesso scenario, ma simili se paragonate con gli altri fattori.

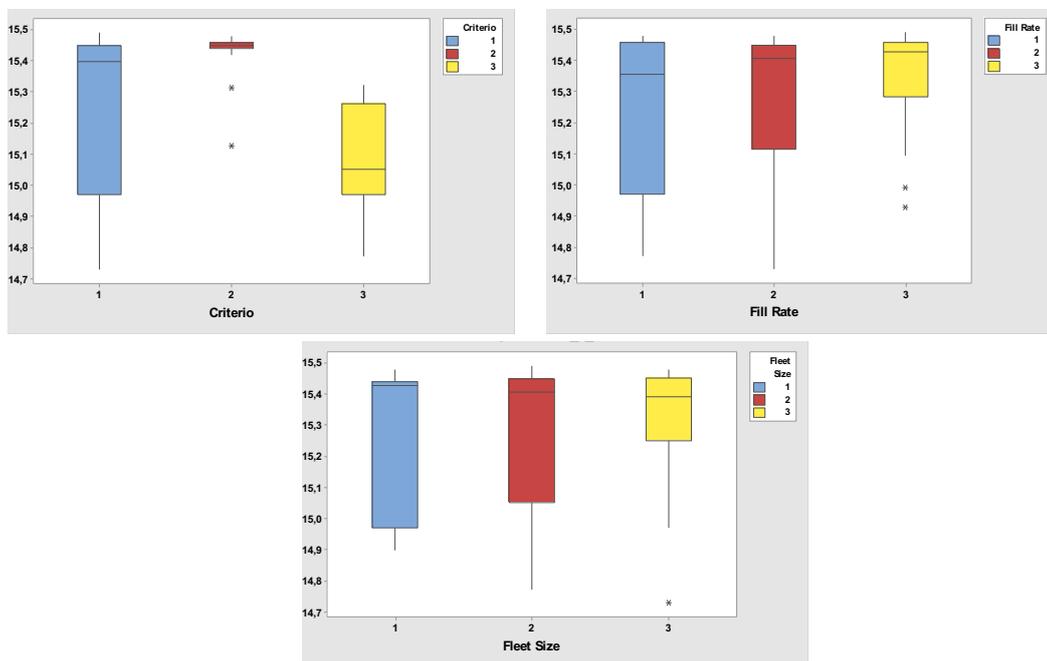


Figura 3.33 - Boxplot del throughput in entrata al magazzino considerato su simulazioni con livello di servizio del 95%

Throughput delle uscite dal magazzino. Il valore medio risultante da questa analisi è molto più definito della precedente ed è circa di 15.25 Udc in uscita all'ora. Anche la dispersione e la simmetria delle distribuzioni sono meno accentuate [figura 3.34].

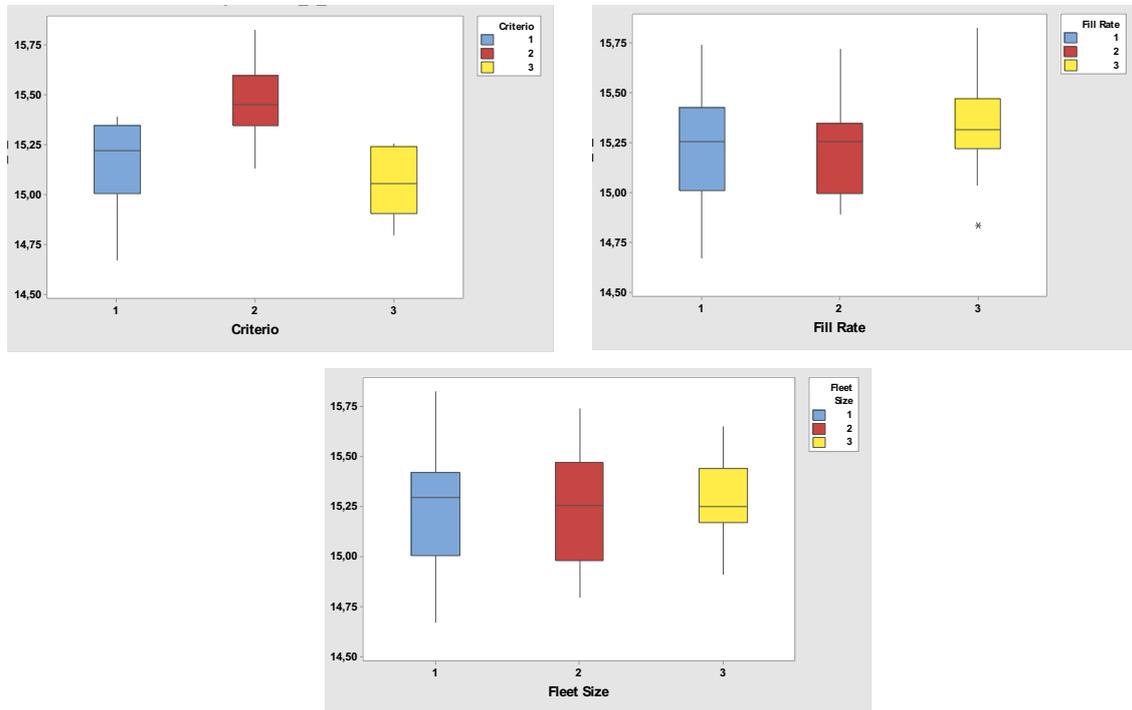


Figura 3.34 - Boxplot del throughput relativo alle uscite del magazzino considerando simulazioni con livello di servizio del 95%

Cicle time dello storage. Dal boxplot [figura 3.35] si può evincere come i risultati più diversi tra loro si abbiano nella scelta del criterio di stoccaggio. I valori medi di ogni grafico cambiano a seconda del fattore considerato, ma il valore medio è compreso tra 65 e 72.5 Udc. Le dispersioni delle distribuzioni sono molto variabili tra di loro: nel grafico in alto a destra sono vicine al punto medio, negli altri casi presentano valori molto distanti.

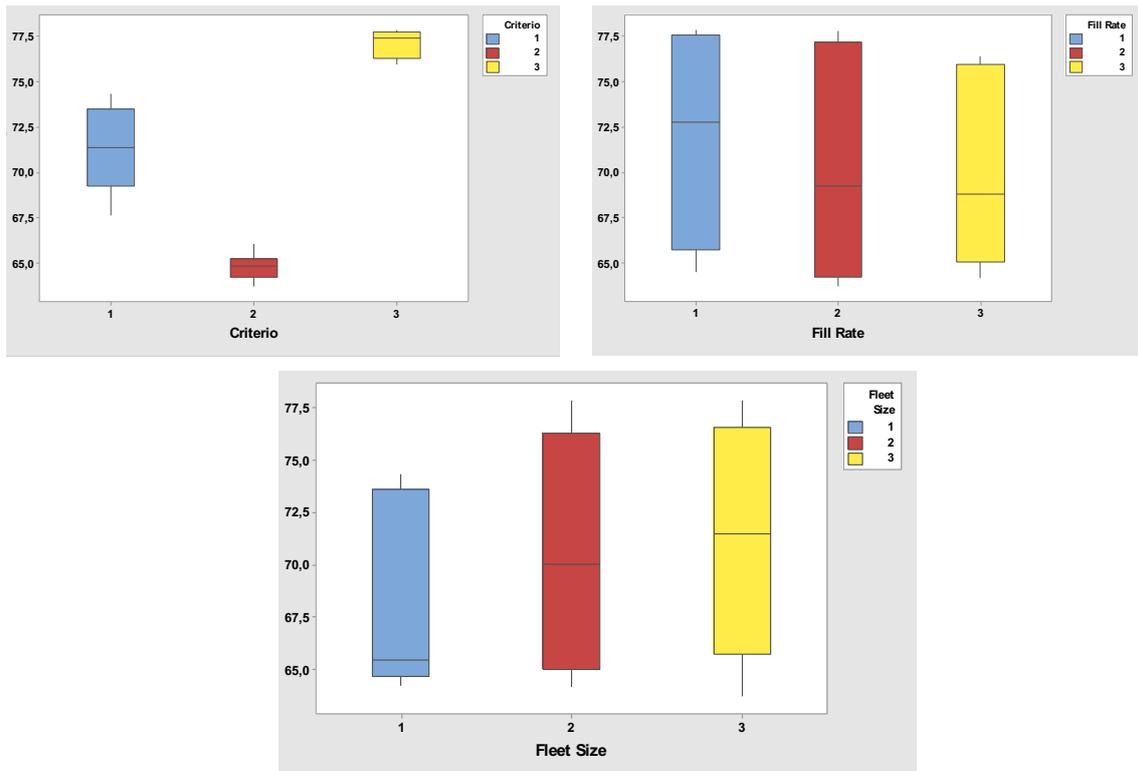


Figura 3.35 - Boxplot relativo al CT dello storage che considera simulazioni con livello di servizio del 95%

Cycle time del retrieval. In questo caso i risultati più differenti si hanno nella scelta del criterio di stoccaggio: questo fattore modifica in maniera ben definita le medie e le distribuzioni dei dati dei vari scenari [figura 3.36]. I valori risultanti dal raffronto di questa variabile con fill rate e dimensione della flotta sembrano essere molto più simili tra loro con distribuzioni disperse e poco simmetriche.

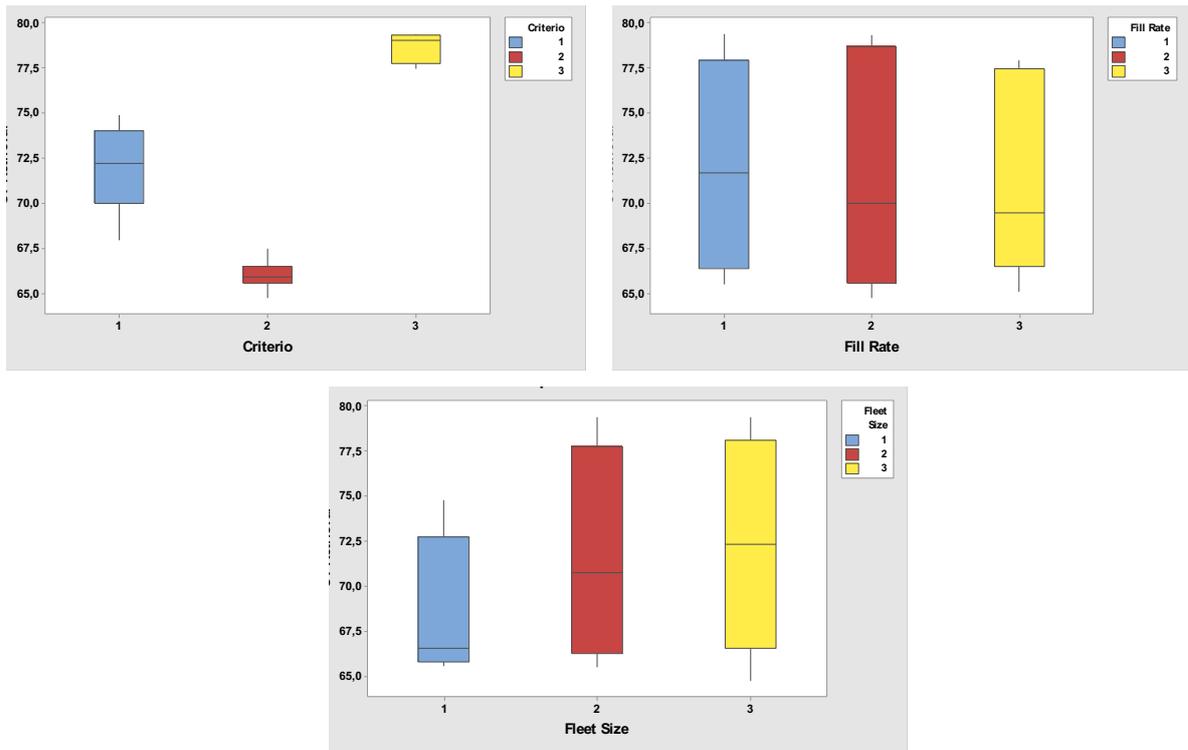


Figura 3.36 - Boxplot relativo al CT del retrieval considerando simulazioni con un livello di servizio del 95%

Cicle time del tempo di attesa in ingresso al magazzino. I risultati di questa analisi sono rappresentati nei boxplot di figura 3.37 in cui il valore medio generale varia tra i 40 ed i 45 secondi.

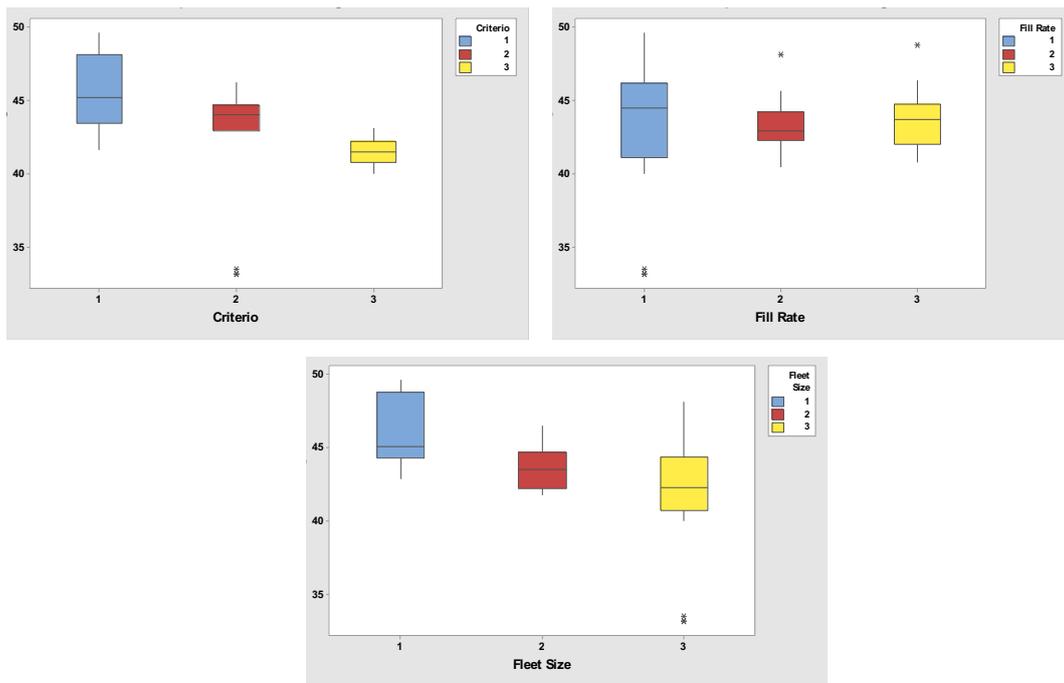


Figura 3.37 - Boxplot del CT del tempo di attesa in fase di stoccaggio di simulazioni che presentano livello di servizio del 95%

Cicle time del tempo di attesa delle Udc in fase di retrieval. Anche in questa situazione, come nel caso normale, i valori in output erano superiori rispetto alle altre medie per via di quei valori che erano di molto superiori alla media attesa. Difatti la media presente nel boxplot di figura 3.38 è di circa 2200 secondi, stima affetta dalla presenza di vari outlier.

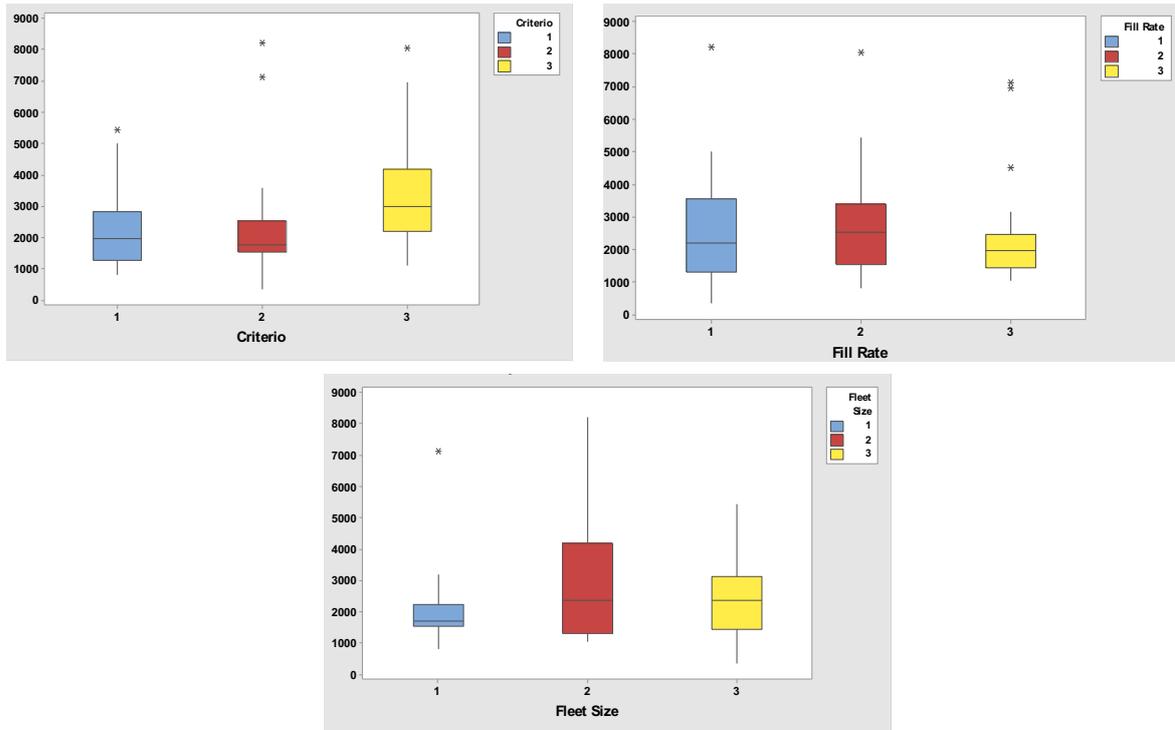


Figura 3.38 - Boxplot relativo al CT di attesa in uscita dal magazzino considerando simulazioni con livello di servizio del 95%

4. Conclusioni

La crescente flessibilità richiesta alle aziende fornitrici di servizi e prodotti ha portato ad una ricerca sempre più assidua di un metodo per minimizzare i costi e ridurre i tempi di produzione.

In particolare, il pastificio considerato come caso studio ha trovato risposta nell'utilizzo del sistema di *material handling* AVS/RS. Questo sistema fornisce una maggiore elasticità rispetto ai sistemi tradizionali che permette di coniugare al meglio la rigida cadenza del sistema produttivo con la flessibilità, sempre più crescente, richiesta dai clienti.

Lo scopo di questo lavoro è stato lo sviluppo di una metodologia di analisi per AVS/RS basato sulla simulazione a eventi discreti. Il lavoro principale è consistito nel modellizzare dettagliatamente le logiche tecnologiche e gli scenari di impiego di tale sistema, in modo da ottenere risultati utili alla decisione del progettista di sistema e, più avanti nel ciclo di vita, del suo utilizzatore.

Per rendere il modello fruibile anche a utente non esperto di Flexsim e, comunque, minimizzare i tempi di creazione del modello stesso, nella prima parte della tesi, è stato mostrato come è stato creato un meta-modello capace di costruire una simulazione autonomamente a partire da un insieme finito di variabili che definiscono l'ambiente del magazzino e tutte le attività che devono essere svolte. In dettaglio, il modello realizzato è capace di:

- Creare tutti gli oggetti discreti (veicoli, scaffalature, percorsi) che agiscono nel magazzino considerando le proprietà che li caratterizzano tramite parametrizzazione;
- Stoccare le Udc in ingresso considerando diverse logiche implementate;
- Mostrare in tempo reale lo stato del sistema simulato tramite grafica 3D;
- Simulare lo stato del sistema per intervalli di tempo scelti dall'operatore e conservare tutti i valori relativi alle Udc riguardo throughput e cycle time, ad uso di statistiche di post-processing.

Il modello realizzato è stato validato tramite il caso studio di un pastificio che è in procinto di adottare il sistema. È stata effettuata, in primo luogo, un'analisi dei requisiti basata sulla produzione del 2017. Dopodiché, la prestazione del sistema è stata valutata osservando diversi scenari, variando:

- Scelta del criterio di stoccaggio;
- Fill rate, ovvero la percentuale di spazio a disposizione occupata,

- Dimensione della flotta AVS/RS;
- Tassi di inter-arrivo in ingresso ed in uscita delle Udc dal magazzino.

I risultati dell'analisi mostrano che un ciclo doppio (stoccaggio e ripresa) consente di raggiungere un throughput di circa 30 Udc all'ora. Questo valore risulta essere nel range di valori accettabili perché il magazzino possa avere un funzionamento consono ai requisiti.

Si osserva anche che, una volta realizzato il sistema, la scelta del criterio di utilizzo può influenzarne il funzionamento in maniera decisa.

In generale, il modello si è rivelato uno strumento particolarmente utile per la validazione di un AVS/RS. Mediamente, la creazione di un modello richiede circa:

- 30 secondi perchè l'utente possa inserire i valori delle variabili necessarie
- 3 secondi per la creazione del modello
- Meno di un 1 minuto per simulare quattro giornate di attività

I valori riportati sono stati rilevati su un normale PC desktop con CPU di frequenza 3.10 GHz, 8.00 Gb RAM, 500 Gb HDD.

L'attività riportata in questa tesi ha costituito parte del lavoro di sviluppo del progetto di ricerca "Safe&Green Intralogistic System with 4.0 integrations" (SaGrIs 4.0) co-finanziato dalla Regione Piemonte.

4.1. Sviluppi futuri

Il modello sviluppato finora ha permesso di raggiungere risultati soddisfacenti. Tuttavia, l'attività di validazione ha mostrato come alcune ulteriori implementazioni possano essere aumentare il numero delle casistiche osservabili o migliorare l'esperienza dell'utente. In particolare:

- Tipicamente in un magazzino vengono stoccate Udc diverse per tipo di prodotto, per lotto di produzione o per dimensioni. Fra gli sviluppi del modello sarà utile considerare la possibilità di creare Udc di tipo diverso e gestirle, ad esempio, con criteri di posizionamento che mantengano vicine Udc dello stesso tipo.
- La possibilità di gestire un numero di satelliti maggiore rispetto a quello degli shuttle;
- Così come per la decisione della posizione di stoccaggio, diversi criteri per la decisione della Udc da prelevare possono essere adottati in funzione del particolare scenario di impiego. Pertanto, sarà opportuno aumentare il numero di scelte anche fra i criteri di prelievo.

- Nel modello implementato, l'osservazione della performance si è limitata a parametri legati alla rapidità con cui una Udc può essere inserita nel magazzino o resa disponibile per la spedizione al cliente. Tuttavia, le imprese si stanno orientando verso scelte più consapevoli anche in materia energetica. Sarebbe, quindi, opportuno fornire al modello la capacità di calcolare anche l'energia necessaria per compiere una movimentazione e, eventualmente, implementare dei criteri di stoccaggio/prelievo in modalità 'energy saving' da adottare nelle fasce orarie in cui il costo dell'energia è maggiore.
- Allo stato attuale, il veicolo incaricato di una missione viene scelto sulla base della sua distanza geometrica dal punto di inizio attività. Tuttavia, i veicoli che si muovono nelle diverse direzioni hanno velocità anche molto diverse e sarebbe, quindi, più opportuno scegliere il veicolo sulla base della rapidità con cui esso può giungere al punto di inizio missione.
- In fase di progettazione, una configurazione viene scelta sulla base della prestazione che può raggiungere ma anche in funzione del costo della soluzione. Pertanto, potrebbe essere utile implementare nel modello anche una funzionalità capace di calcolare, almeno indicativamente, il costo presunto della soluzione che si sta simulando, giungendo così a un vero e proprio configuratore di AVS/RS.
- Infine, per migliorare l'esperienza d'uso del modello sarà opportuno implementare un'interfaccia grafica con la quale possano essere assegnati i valori delle variabili di input e si possa osservare una dashboard con gli indicatori di performance più significativi.

5. Bibliografia

- [1] “La Globalizzazione Definizione della globalizzazione. <https://www.matteotti.it/NS/docs/dispense/La%20globalizzazione.pdf>”
- [2] F. Tecnologico, “Logistica integrata Riduzione costi e aumento del valore Corrado Cerruti Università di Roma Tor Vergata. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwj-67T16YrfAhWEZFAKHcvaD5sQFjAAegQICRAC&url=http%3A%2F%2Fwww.mc.camcom.it%2Fdownload%2F277.html&usg=AOvVaw1mVFKzYx1OU3VYk7xVCI81>”
- [3] T. Lerher, B. Y. Ekren, Z. Sari, and B. Rosi, “Method for evaluating the throughput performance of shuttle based storage and retrieval systems,” *Teh. Vjesn. - Tech. Gaz.*, vol. 23, no. 3, pp. 715–723, 2016.
- [4] G. D’Antonio, M. De Maddis, J. S. Bedolla, P. Chiabert, and F. Lombardi, “Analytical models for the evaluation of deep-lane autonomous vehicle storage and retrieval system performance,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 94, no. 5–8, pp. 1811–1824, 2018.
- [5] C. J. Malmborg, “Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 40, no. 8, pp. 1807–1822, 2002.
- [6] P. H. Kuo, A. Krishnamurthy, and C. J. Malmborg, “Design models for unit load storage and retrieval systems using autonomous vehicle technology and resource conserving storage and dwell point policies,” *Appl. Math. Model.*, vol. 31, no. 10, pp. 2332–2346, 2007.
- [7] B. Y. Ekren, S. S. Heragu, A. Krishnamurthy, and C. J. Malmborg, “Simulation based experimental design to identify factors affecting performance of AVS/RS,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 58, no. 1, pp. 175–185, 2010.
- [8] B. Y. Ekren and S. S. Heragu, “Performance comparison of two material handling systems: AVS/RS and CBAS/RS,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 50, no. 15, pp. 4061–4074, 2012.
- [9] B. Y. Ekren and S. S. Heragu, “Simulation based performance analysis of an autonomous vehicle storage and retrieval system,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 19, no. 7, pp. 1640–1650, 2011.

- [10] S. S. Heragu, X. Cai, A. Krishnamurthy, and C. J. Malmborg, "Analytical models for analysis of automated warehouse material handling systems," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 49, no. 22, pp. 6833–6861, 2011.
- [11] B. Zou, X. Xu, Y. Gong, and R. De Koster, "Modeling parallel movement of lifts and vehicles in tier-captive vehicle-based warehousing systems," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 254, no. 1, pp. 51–67, 2016.
- [12] T. Lerher, "Design of Experiments for Identifying the Throughput Performance of Shuttle-Based Storage and Retrieval Systems," *Procedia Eng.*, vol. 187, pp. 324–334, 2017.
- [13] G. Bruno, G. D. Antonio, and M. De Maddis, "Sustainability Analysis of Autonomous Vehicle Storage and Retrieval Systems" vol. 12, pp. 299–306, 2016.
- [14] A. Akpunar, B. Yetkin Ekren, and T. Lerher, "Energy efficient design of autonomous vehicle based storage and retrieval system," *J. Appl. Eng. Sci.*, vol. 15, no. 1, pp. 25–34, 2017.
- [15] Eurofork, "<https://www.eurofork.com/en/vision-mission-code-of-conduct>."
- [16] W. Dimensions, "ESMARTSHUTTLE® Warehouse Example, <https://www.eurofork.com/sites/default/files/download/eurofork-esmartshuttle-catalogue-2018.pdf>" 2014.
- [17] "Modelli e Metodi per la Simulazione (MMS) (MMS). <http://adacher.dia.uniroma3.it/SSPL/lezione1.pdf>"
- [18] S. Ad and E. Discreti, "Simulazione ad eventi discreti, <http://adacher.dia.uniroma3.it/SSPL/lezione1.pdf>" pp. 1–47, 2012.
- [19] A. Iovanella, "Antonio Iovanella. http://www.uniroma2.it/didattica/mss1/deposito/Introduzione_alla_simulazione.pdf"
- [20] M. W. Barnett, "in Business Process Management," <https://www.bptrends.com/publicationfiles/11-03%20WP%20Mod%20Simulation%20of%20BPM%20-%20Barnett-1.pdf>, *Model. Simul. Bus. Process Manag.*, pp. 1–10, 2003.

- [21] M. Simonetti, “Modelli di simulazione per la logistica tramite, https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjN8fGT7IrfAhULzqQKHRcECiwQFjAAegQICRAC&url=http%3A%2F%2Fdidattica.uniroma2.it%2Ffiles%2Fscarica%2Finsegnamento%2F160359-Logistica-Integrata%2F37254-Lezione-20-Apr-16-Simulazione-con-SIMIO&usg=AOvVaw1GDsUOTxq-E29J__LF_qGq” no. Ic, pp. 1–95, 2015.
- [22] R. M. Thiesing and C. D. Pegden, “<https://informs-sim.org/wsc13papers/includes/files/407.pdf>” pp. 4090–4099, 2015.
- [23] G. Tmsg and G. Tmsg, “La Simulazione è ... Sistemi Lavorare col sistema ? Il processo. <http://www00.unibg.it/dati/corsi/8930/38419-Simulazione%20e%20programma%20ARENA.pdf>”
- [24] Flexcon, “<http://www.flexcon.it/products/flexsim-en/flexsimg.>” .
- [25] Flexsim - risorse, “<https://answers.flexsim.com/articles/19497/flexsim.>” .
- [26] Flexsim - attività, “<https://answers.flexsim.com/articles/23397/why-use.>” .
- [27] A. Menini and A. Parbonetti, “Strategie e performance nel food & beverage italiano.”