# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Facoltà di Ingegneria
Corso di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di laurea

## PROGETTAZIONE DI INNOVATIVI SISTEMI DI STOCCAGGIO INTENSIVI

Relatore: Dott. Fabio SGARBOSSA

Candidato: Luca BORTIGNON

Anno Accademico 2014/2015

# INDICE

SOMMARIO……4

INTRODUZIONE……5

CAPITOLO I – INTRODUZIONE E SISTEMI DI STOCCAGGIO INNOVATIVI……6

1.1 Sistemi di stoccaggio innovativi……8

1.1.1 Satellite - based system……11

1.1.2 Live-Cube compact storage system……14

1.1.3 Conveyor - based system……18

1.1.4 AVS/R……22

1.2 Sistemi innovativi per contenitori……25

1.2.1 Sistemi automatizzati con veicoli per contenitori ad alta movimentazione……26

1.2.2 Sistemi automatizzati con veicoli per contenitori ad non alta movimentazione……28

1.2.3 Sistemi automatizzati di stoccaggio con "3D robot"……29

1.2.4 Sistemi automatizzati con scaffalature di picking mobile……34

CAPITOLO II – POLITICHE DI ALLOCAZIONE DELLA MERCE E OTTIMIZZAZIONE DEI MAGAZZINI……36

2.1 Politiche di allocazione della merce……36

2.2 Formulazione generale del modello matematico……39

CAPITOLO III – SISTEMA AUTOSTORE……45

3.1 Introduzione……45

3.1.1 Il sistema……46

3.1.2 La griglia……46

3.1.3 I contenitori……46

3.1.4 I punti di I/O……47

3.1.5 I robot……47

3.1.6 Il sistema di controllo……48

3.1.7 L'access piont……48

3.2 I benefici……48

3.3 Modello matematico……49

3.3.1 Tempo di recupero/deposito……52

3.3.2 Tempo di recupero medio……53

3.3.3 Forma ottima……..54
3.3.4 Potenzialità di movimentazione oraria……..56

CAPITOLO IV – TORNADO MINILOAD CRANE……58
4.1 I sistemi Miniload……58
4.1.1 Organi di presa……...59
4.2 Swisslog Tornado Miniload Crane……...……61
4.2.1 Caratteristiche generali……..62
4.2.2 Elettricità e controlli……..62
4.2.3 Strutture, guide e montanti……62
4.2.4 Sistemi di presa e contenitori……63
4.3 Modello matematico……63
4.3.1 Introduzione……...63
4.3.2 Modello per un dual-shuttle basato sulle normative F.E.M……...65

CAPITOLO V – CASI STUDIO……68
5.1 Casi reali……...68
5.1.1 Yellow cube……..……68
5.1.2 Antalis……71
5.1.3 ASDA, UK……74
5.1.4 Competec Logistik……76
5.1.5 Riepilogo……79
5.2 Simulazione Monte Carlo……86
5.3 Confronto tra AutoStore e Tornado Miniload……..88

BIBLIOGRAFIA……95

# SOMMARIO

Ultimamente l'evoluzione del mercato e l'elevato costo della manodopera hanno enormemente complicato il ruolo dei magazzini, in quanto molte aziende, per contenere i costi di manodopera, hanno spostato la produzione in paesi emergenti rendendo particolarmente complessa la programmazione della produzione, quindi la corretta determinazione della capacità di stoccaggio del magazzino. Inoltre nelle aree urbanizzate i costi dei terreni necessari per implementare tutte le infrastrutture collegate ad un magazzino sono sempre più elevati. Queste tendenza ha portato a minimizzare le dimensioni dei sistemi di stoccaggio, dai magazzini intensivi a super intensivi (o 3D). L'importanza di tali sistemi di stoccaggio innovativi si riflette, non solo sugli investimenti iniziali, ma anche sui costi di gestione del magazzino, si pensi solo al risparmio sul condizionamento dell'aria riducendo sensibilmente il volume da trattare, e sull'organizzazione di ricezione e spedizione degli ordini.
Dopo l'avvento di nuovi sistemi innovati, la letteratura tecnica continua a latitare per quanto riguarda la progettazione ottimale di tali magazzini ed è qui vuole inserirsi questa tesi.

# INTRODUZIONE

Una volta introdotti ruolo e importanza dei magazzini, il primo capitolo di questa tesi va ad analizzare stato dell'arte e letteratura sui sistemi di stoccaggio, in particolar modo sui sistemi 3D per pallet e per contenitori.
Il secondo capitolo affronta i problemi di allocazione della merce, e di ottimizzazione del magazzino. Dopo aver esposto i vari metodi di allocazione con relativi vantaggi e svantaggi, è descritto un modello matematico generale per l'ottimizzazione delle dimensioni di un magazzino con data capacità di stoccaggio del sistema. Tale modello sarà utile come linea guida nei successivi capitoli.
Nel terzo capitolo si entra nel cuore della tesi, ed è analizzato più profondamente il sistema AutoStore, sia dal punto di vista fisico/tecnologico sia dal punto di vista del funzionamento. Il passo successivo è quello di creare un modello matematico utile per ottimizzare le dimensioni del magazzino. Sono analizzati le dimensioni principali, le velocità di spostamento, il tempo medio di recupero per una unità di carico, il tempo medio per un ciclo combinato e la potenzialità di movimentazione oraria. E' così introdotto un modello matematico che sarà successivamente verificato e confrontato con casi reali e simulazioni.
Il quarto capitolo è utile per introdurre un sistema di stoccaggio già presente in commercio e analizzato in letteratura: il Tornado Miniload Crane di Swisslog. Tale sistema, caratterizzato dalla capacità di spostare due unità di carico contemporaneamente, servirà come magazzino di confronto per le prestazioni del sistema AutoStore, sia dal punto di vista delle dimensioni che dal punto di vista della potenzialità di movimentazione e della potenzialità ricettiva.
Il quinto e ultimo capitolo risulta denso di verifiche e soluzioni. Si inizia con il confronto del modello matematico proposto con i casi reali. Si continua con una simulazione Monte Carlo, per verificare i tempi di recupero dei bin. Inoltre si analizza l'impatto dei vari parametri sulle dimensioni e sulle prestazioni del sistema. Si finisce con un confronto profondo e completo tra il sistema AutoStore e il sistema Tornado, per quanto riguarda dimensioni e prestazioni.
Con questa tesi si cerca di colmare alcune lacune nella letteratura nel campo della progettazione dei nuovi sistemi di stoccaggio, introducendo un primo modello matematico che dovrà successivamente migliorato introducendo traiettorie più precise, accelerazioni, decelerazioni, e dimensionamenti in funzione del criterio di allocazione della merce.

# CAPITOLO I
# INTRODUZIONE E SISTEMI DI STOCCAGIO INNOVATIVI

I magazzini sono presenti in tutte le realtà commerciali e industriali per:

- contenere scorte di materiali;
- permettere il riassortimento dei materiali e la formazione di nuovi lotti diversi per articolo/quantità.

Le ragioni che obbligano le aziende a creare e mantenere scorte più o meno grandi materie prime, componenti, semilavorati e prodotti finiti, sono:

- smorzare le irregolarità dei consumi (ovvero dello stadio logistico a valle);
- smorzare le irregolarità dei ricevimenti (ovvero dello stadio logistico a monte);
- ottenere flessibilità rispetto alla variazione del mix produttivo e di volumi;
- agevolare la distribuzione e i trasporti;
- ovviare alla inaffidabilità degli impianti;
- attutire le ripercussioni dovute a problemi di qualità;
- appianare le inattendibilità delle previsioni della domanda;
- ovviare alla programmazione non adeguata;
- cautelarsi da fornitori non affidabili o non flessibili.

Il magazzino deve essere perfettamente inserito nel ciclo logistico dell'azienda. Ultimamente l'evoluzione del mercato e l'elevato costo della manodopera hanno enormemente complicato il ruolo dei magazzini, in quanto molte aziende, per contenere i costi di manodopera, hanno spostato la produzione in paesi emergenti rendendo particolarmente complessa la programmazione della produzione, quindi la corretta determinazione della capacità di stoccaggio del magazzino. Peraltro i clienti, per minimizzare i loro costi, richiedono ai fornitori poco materiale alla volta su pallet multistrato multiprodotto con bolla d'accompagnamento possibilmente redatta corrispondentemente alla sequenza di scarico dei prodotti. Solamente alcune grosse aziende leader di settore non hanno questi problemi e scambiano lotti di quantità costante, e ciò accade quando il bene è prodotto in enormi quantità ed è poco diversificato (come il mercato del latte e dello yoghurt).
In ogni caso non è errato affermare che la dimensione del magazzino di un'azienda dipende dai ritmi del mercato a valle e a monte e il grado di automazione deve essere ben equilibrato rispetto al

sistema produttivo.
I magazzini significano capitali immobilizzati, con elevati interessi passivi, soggetti anche ad un progressivo deprezzamento, nel caso di deteriorabilità della merce stoccata. Pertanto le scorte devono essere limitate al minimo indispensabile, adottando una intelligente politica di approvvigionamenti, standardizzando materie prime, materie prime, i semilavorati e i prodotti finiti. I magazzini richiedono notevole spazio e ogni metro cubo di spazio destinato a magazzino incide per una certa aliquota sui costi dell'azienda, per ammortamenti, riscaldamento, illuminazione, condizionamento, etc., senza che a ciò corrisponda un adeguato vantaggio.

I magazzini sono nodi importanti nelle supply chain. Essi servono per disaccoppiare le forniture dalla domanda nel tempo di consegna, nell'assortimento, la quantità, e lo spazio. La presenza dei magazzini permette la realizzazione di economie di scala nel settore dei trasporti, in quanto permettono di raggruppare i flussi delle merci portando così ad un costo inferiore. Consentono inoltre di rinviare il momento in cui si interviene sul prodotto creando valore aggiunto, aumentando così il livello di servizio di materie prime. Questo è il motivo per cui tutte le catene di approvvigionamento di prodotti prevedono depositi in più punti, sia insourced che outsourced: presso i fornitori, i produttori, i grossisti, le rivendite al dettaglio e i negozi. I magazzini sono particolarmente necessari nelle aree densamente popolate, vicino a dove si genera la domanda e dove il lavoro è disponibile. I magazzini moderni richiedono un ampio spazio per realizzare le economie di scala a cui mirano: strade (a volte ferrovie e corsi d'acqua), infrastrutture intorno alla facility, spazio per il parcheggio di camion e rimorchi, spazio per l'attracco dei camion, e lo spazio all'interno della struttura stessa. Quindi l'area occupata dai magazzini risulta molto estesa, ed è piuttosto comune che superi i 10.000 $m^2$ (De Koster e Balk, 2008). Purtroppo, proprio perché tali impianti sono necessari nelle zone densamente popolate, la disponibilità di aree libere adatte alla creazione delle strutture basilari è sempre minore. In tali esercizi, il commissionamento, ossia il processo di raccolta degli ordini del cliente e conseguente invio di merci in quantità verso un altro magazzino o centro di distribuzione (DC), è una delle attività più critiche (De Koster et al., 2007), ed è stato identificato come un processo ad alta intensità di manodopera e sistemi manuali (Goetschalckx e Ashayeri, 1989; Drury, 1988; De Koster et al., 2007; Tompkins et al., 2010). Il costo di picking in un magazzino standard può raggiungere fino il 55% della spesa di funzionamento totale del magazzino (Tompkins et al, 2010). Inoltre, secondo la Bureau of Labor Statistics, entro il 2014, il numero di lavoratori over 55 dovrebbe essere cresciuto al 20% della forza lavoro, rispetto al 15% del 2004 (BLS rapporto del 2004). In ambito accademico vi è un crescente consenso, riguardo al fatto che i sistemi di storage tradizionali non affrontino tali problemi in maniera convincente. Pertanto, le imprese si stanno muovendo verso un sistema di

immagazzinamento di nuova generazione, ovvero i "3D compact storage systems". Questi sistemi sono progettati in modo da ridurre l'area occupata e i costi di funzionamento, aumentare l'affidabilità del processo di prelievo dell'ordine, ridurre la percentuali degli errore, e abbreviare i tempi di risposta. Altra caratteristica è che, anche se i costi di funzionamento e di costruzione risultano più bassi, questi sistemi richiedono elevati investimenti in automazione.

## 1.1 Sistemi di stoccaggio 3D

Quando una unità di carico è richiesta in un sistema di stoccaggio tradizionale, un veicolo (un carrello elevatore, oppure una navetta munita di un traslo elevatore) si sposta nella posizione assegnata, preleva la merce, e la trasporta nel punto input-output (I /O). Tali sistemi contengono necessariamente navate lungo le quali si muove il veicolo, e tali corridoi occupano spazio che potrebbe altrimenti essere utilizzato per immagazzinare gli oggetti. La conseguenza primaria è che i corridoi riducono la densità complessiva, cioè il numero di unità di carico stoccabili per metro quadrato o cubico. La densità è una considerazione importante nella progettazione dei magazzini perché se bassa significa che è necessario più spazio per depositare lo stesso numero di prodotti, e questo porta ad un volume totale maggiore con conseguente aumento dei costi, sia iniziali che di gestione. Fissi, perché è più costoso da costruire, e variabili, perché i lavoratori o i veicoli devono effettuare viaggi più lunghi per recuperare le unità di carico, e presenta maggiori costi di gestione. Ci sono diversi modi per aumentare la densità in un sistema di stoccaggio. Il primo è quello di ridurre le larghezze e il numero delle corsie; ma navate più strette portano anche alcuni problemi:

- di solito richiedono veicoli specializzati (e di conseguenza più costosi);
- spesso portano a corsie a senso unico, aumentando le percorrenze;

Il secondo è quello di aumentare la profondità di corsia, o il numero massimo di elementi immagazzinati (uno dietro l'altro) per tutta la lunghezza del corridoio. Per questo motivo gli scaffale sono comunemente realizzati con una doppia profondità di stoccaggio, in cui due pallet (uno dietro l'altro) vengono depositati in fila. Se si vuole aumentare ancora la profondità si deve passare a magazzini automatizzati e compatti.

I sistemi di storage/retrieval (stoccaggio/recupero) automatici tradizionali (noti anche come bi-dimensionali, 2D, o AS/RS) storicamente sono stati ampiamente usati negli ambienti che si occupano di distribuzione e produzione fin dalla loro introduzione nei primi anni '50. Un AS/RS è un sistema in grado di gestire automaticamente le unità di carico (siano esse pallet, borse, etc.). Fisicamente tali sistemi presentano come elementi principali navate, scaffalature per lo stoccaggio, macchine atte alle operazioni di deposito e prelievo (dette macchine S/R), e punti di input-output

(I/O) (Roodbergen e Vis, 2009). Le macchine S/R possono autonomamente muoversi nelle direzioni *x* e *y*, compiere azioni di prelievo e stoccaggio delle unità di carico (UdC). Operano in corridoi appositamente posizionati tra gli scaffali. Ogni macchina ha uno o più punti di input/output per scaricare le UdC recuperate o per raccogliere le unità di carico pronte essere depositate. In tali sistemi, le unità di carico vengono generalmente immagazzinate in scaffalature a singola profondità (ovvero nella direzione della profondità si può posizionare una sola UdC). In un sistema AS/RS tradizionale uno tra i principali difetti è che i corridoi tra gli scaffali occupano una percentuale significativa dello spazio in pianta (Yu e De Koster, 2009a). La carenza di terreni utilizzabili per la creazione di nuovi magazzini ha spinto le aziende a sistemi di immagazzinamento compatti, o 3D, per unità di carico (ad esempio pallet, borse, contenitori), riducendo costi e dimensione dell'edificio. Magazzini più piccoli portano ad abbassare i costi di investimento e di esercizio (Gue e Kim, 2007). Per questi ed altri motivi i sistemi 3D sono diventati sempre più popolari per lo stoccaggio dei prodotti (Hu et al, 2005). In tali magazzini compatti le unità di carico vengono stoccate in profondità multiple, occupando quindi meno spazio in pianta rispetto ai corrispondenti magazzini 2D.

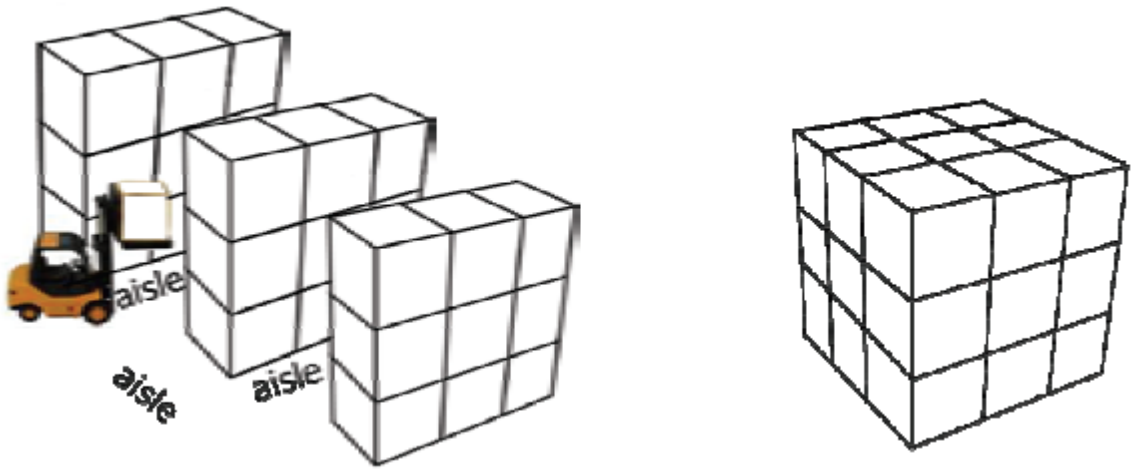


***Figura 1.1.*** *Differenza tra un magazzino 2D ( a sinistra) e uno 3D (a destra).*

La figura 1.1 mostra come i sistemi compatti 3D richiedano meno area calpestabile rispetto ai sistemi tradizionali 2D. In sintesi, rispetto un sistema 2D AS / RS, i sistemi 3D hanno due vantaggi principali:

- Il tempo di attraversamento del carico è spesso breve grazie ad un pre-posizionamento delle celle di carico, alla compattezza e alla completa automazione del sistema. Alcuni sistemi 3D hanno molteplici meccanismi di movimento di profondità (DMM) in grado di operare indipendentemente e simultaneamente preparare in posizioni predefinite le celle vuote

(ovvero, le posizioni di stoccaggio vuote) e i carichi di recupero, mentre i meccanismi atti al movimento orizzontale e verticale (una macchina S/R oppure trasportatori ed elevatori) si concentrano su altre operazioni. Inoltre, rispetto ad un sistema 2D, le unità di carico sono mediamente più vicine alla posizione di deposito, il che contribuisce ad una ulteriore riduzione del tempo necessario al posizionamento.

- Lo spazio da dedicare al magazzino può essere notevolmente minore in quanto la maggior parte dell'area calpestabile tradizionalmente riservata per le navate viene risparmiata stoccando le UdC in un sistema a più profondità. A seconda della configurazione, in un sistema di stoccaggio compatto circa il 40-50% in pianta può essere liberato rispetto ai magazzini tradizionali considerando constate la capacità di immagazzinamento misurata in UdC (Hyundai Ascensore, 2011).

Esistono diversi tipi magazzini compatti 3D con varie soluzione per quanto riguarda i sistemi di movimentazione, tra i quali macchine S/R, shuttle, navette, ascensori, sia per quanto riguarda i movimenti orizzontali/verticali che di profondità. In linea di principio, ogni carico può individualmente accessibile, anche se in alcuni casi un rimescolamento può essere necessario. Se le richieste di prelievo sono note prima del tempo utile effettivo, tali magazzini possono essere utilizzati anche per carichi unitari automaticamente pre-assortiti all'interno del sistema, in modo che la singola UdC possa essere rapidamente recuperata quando necessario. Nella concezione più semplice di un magazzino compatto a più profondità un sistema di trasporto dedicato si occupa del movimento proprio nella direzione di profondità delle unità di carico. Già per questa soluzione base ci sono almeno due varianti: trasportatori a gravità e trasportatori motorizzati. Un'altra possibile soluzione del sistema base di stoccaggio compatto è quando una macchina satellite (navetta) gestisce il movimento in profondità. Il satellite è legato macchina S/R e può muoversi nella dimensione di profondità per prelevare o stoccare carichi posizionati più internamente. La macchina S/R attende il satellite all'inizio della corsia selezionata, mentre quest'ultima recupera o posiziona il pallet. Tipicamente, le macchine S/R possono muoversi nelle direzioni orizzontale e verticale contemporaneamente.

I veicoli automatizzati nei sistemi di deposito/recupero (AVS / RS) rappresentano un tecnologia relativamente nuova per i magazzini automatici. All'interno dello scaffale di stoccaggio, la chiave di distinzione dei sistemi AVS/R è il modello di movimentazione del sistema di manipolazione delle unità di carico (Fukunari e Malmborg, 2007). In un sistema AVS / R, i veicoli condividono un numero fisso di ascensori per il movimento verticale, mentre seguono percorsi di flusso rettilinei in due dimensioni per movimento orizzontale.

Una soluzione diversa implementata per i magazzini intensivi (o superi-intensivi) sono i sistemi di

storage detti Live-Cube. In tali sistemi, ogni carico viene posizionato su un shuttle autonomo, che può muoversi nelle direzioni *x* e *y* su ciascun livello. Uno o più ascensori sono destinati per i movimenti verticali attraverso i vari livelli. La tabella 1.1 fornisce una panoramica dei diversi tipi di magazzini compatti.

| Tipo | Trasporto lungo x | Trasporto lungo y | Trasporto lungo z | Tempo per raggiungere la locazione (x,y,z) |
|---|---|---|---|---|
| **Conveyor-based system** | Macchina S/R | Macchina S/R | Trasportatore a gravità o motorizzato | max{max{x,y}+max{x,y} |
| **Satellite-based system** | Macchina S/R | Macchina S/R | Satellite | 2(max{x,y}+z) |
| **Live-Cube system** | Shuttle | Ascensore | Shuttle | max{x+y,z}+z se ci sono più vani vuoti |
| **AVS/R** | Autonomo | Ascensore | Autonomo | Dipende dalla posizione del veicolo |

***Tabella 1.1.*** *Riassunto dei vari tipi di magazzini 3D.*

### 1.1.1 Satellite-based system

Il tipo più comune di sistema di stoccaggio compatto, è un magazzino compatto multi-deep con satelliti. Questo sistema è costituito da una scaffalatura compatta, una macchina S/R con un sistema di movimento dedicato e un punto di I/O (o deposito). La macchina S/R si muove in entrambe le direzioni orizzontale e verticale contemporaneamente. Il satellite collegato alla macchina S/R può muoversi all'interno della corsia di stoccaggio, raggiungere il vano selezionato, depositare o recuperare l'unità di carico, mentre la macchia S/R attende all'inizio della corsia. Tutti i movimenti di deposito e prelievo iniziano con la macchina S/R al punto I/O (situato nell'angolo inferiore sinistro della scaffalatura). Le unità di carico recuperate vengono depositate dalla macchina S/R nel punto di I/O su un nastro trasportatore in uscita pronta per la successiva movimentazione. Il principale limite di questi sistemi è che le unità di carico devono essere movimentate più volte se prodotti diversi vengono immagazzinati sulla stessa linea. Questo in quanto è necessario il processo di rimozione delle unità di carico stoccate davanti al prodotto che deve essere recuperato.
La figura 1.2 illustra un esempio di un sistema di stoccaggio compatto con satellite.
I magazzini compatti con satelliti sono particolarmente utilizzati per lo stoccaggio refrigerato, in quanto i costi di raffreddamento sono direttamente proporzionali al volume di stoccaggio. Maggiore è il volume da condizionare maggiori risultano i costi legato all'immagazzinamento delle merci. Di

conseguenza, questi sistemi sono ampiamente utilizzati nei sistemi di distribuzione di prodotti freschi/surgelati. Inoltre, il processo completamente automatizzato facilita le operazioni di deposito e prelievo in modo da evitare una perdita di qualità dei prodotti.

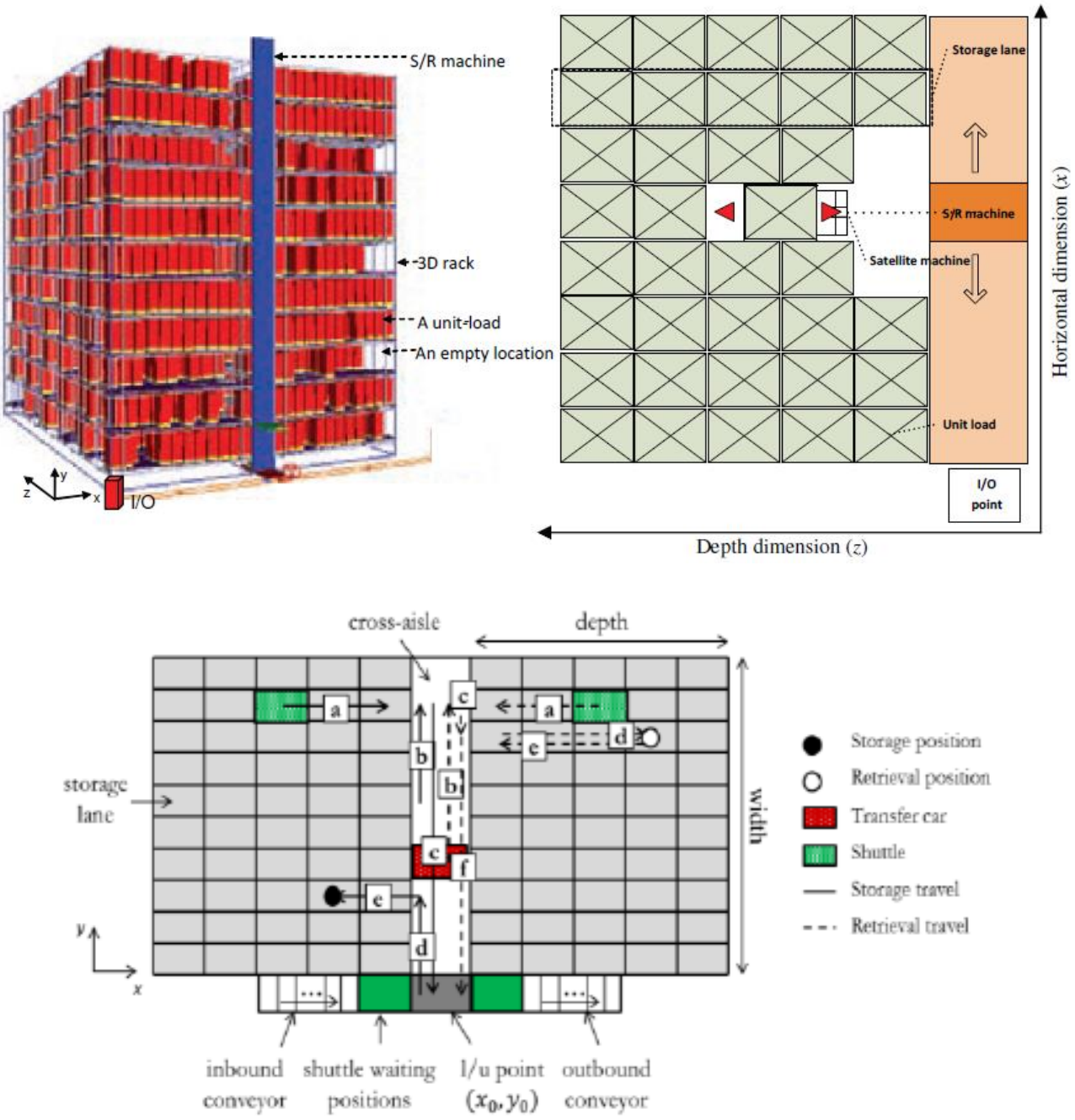


***Figura 1.2.*** *Magazzino a più profondità, e visione dall'alto dello stesso.*

Come già accennato uno dei campi in cui i magazzini AV/RS sono maggiormente utilizzati è quello dello stoccaggio di prodotti freschi o surgelati. I prodotti sono depositati temporaneamente in un frigorifero refrigerato e, nei tempi previsti di arrivo dei camion, recuperati per adempiere gli ordini dei clienti. Le società hanno diversi misure di performance:

- servire i camion in uscita rispettando i loro piani di arriva e partenza dei camion in uscita nel loro previsti orari di arrivo e di partenza;
- prevenire la perdita di qualità riducendo al minimo il tempo durante il quale le unità di carico da spedire rimangono al di fuori dall'ambiente condizionato (cioè refrigerato, con umidità e aria controllata);
- aumentando la produttività e livello di efficienza del sistema.

Minimizzare il tempo totale di recupero è un buon indicatore per tutte le misure. Quando un camion in uscita arriva a la porta di prelievo, il veloce recupero di unità delle carico ordinate dai clienti permette di ridurre i tempi di attesa del camion. Di conseguenza, il camion sarà più probabilmente servito rispettando gli orari di arrivo e di partenza previsti. Il rischio di perdita di qualità è minimo in quanto i prodotti rimangono al di fuori delle zone condizionate per un tempo ridotto. La riduzione del tempo di attesa per ogni camion offre potenzialmente l'opportunità di servire più mezzi all'interno di un turno, conducendo ad una frequenza di attraversamento più elevata e aumentando l'utilizzo del sistema. Il Cross-Docking è stato implementato ampiamente in supplay chain da aziende del calibro di Wal-Mart (Stati Uniti), Albert Heijn (Paesi Bassi), Tesco (UK) e Carrefour (Francia). Il cross-dock opera in una modalità basata sulla movimentazione: i prodotti vengono raccolti la sera, arrivano durante la notte, sono depositati temporaneamente, e poi recuperati e spediti la mattina successiva. Le operazione svolte in maniera veloce ed è efficiente sono possibili grazie all'impiego di sistemi di immagazzinamento e movimentazione automatizzati. I sistemi cross-dock per i prodotti freschi spesso utilizzano magazzini 3D compatti con satelliti, al fine di minimizzare i costi di raffreddamento, che sono direttamente correlati al volume di stoccaggio.

La difficoltà principale con i sistemi multi-profondità è che le unità di carico devono essere rimescolate. Questo è il processo di rimozione di una unità di carico depositata davanti al carico unitario che deve essere immagazzinato o prelevato. In un sistema che opera automaticamente, in una modalità basata sugli spostamenti, i rimescolamenti in uscita sono più critici dei rimpasti in entrata. Le unità di carico provenienti dai camion in entrata possono essere temporaneamente assegnati nelle varie corsie di stoccaggio condizionate riducendo al minimo il tempo totale di deposito e quindi il tempo che i prodotti passano nella zona non condizionata. Questo perché durante il tempo di attesa all'interno dell'area condizionata, i prodotti possono essere rimescolati automaticamente e trasferiti nelle posizioni di conservazione appropriate, senza perdita di qualità. Durante il turno di notte c'è tutto il tempo per i rimescolamenti. Quindi, le scelte di allocazione, prese durante il processo in ingresso, possono essere disaccoppiate da decisioni di sequenziamento in uscita, questo per minimizzare il tempo totale di recupero delle unità di carico. Quindi, a

differenza del processo di uscita, il processo in entrata non è un collo di bottiglia nella operazione di immagazzinamento. Inoltre, poiché caricare i camion è molto più veloce rispetto al recupero delle unità di carico, il collo di bottiglia del processo di uscita è proprio l'operazione di recupero. Minimizzare il tempo totale necessario al recupero durante il processo di uscita è quindi l'obbiettivo perseguito della società.

La soluzione utilizzata attualmente, per evitare di dover rimescolare le unità di carico in uscita, attività critica per l'aumento del tempo totale di recupero nei magazzini compatti, è utilizzare il criterio di stoccaggio in cui ogni corsia è dedicata ad un solo prodotto, proveniente da un unico lotto di produzione. Quindi, se è richiesta una certa quantità di un prodotto, il carico si trova nella zona frontale dello scaffale, e può essere prelevata senza dispendiosi movimenti. Tuttavia, questa politica non utilizza le informazioni sugli ordini, e ciò si traduce in basso utilizzo dello spazio ('alveare') a causa di corsie solo parzialmente riempite (Tompkins et al., 2010). La conseguenza è che devono essere previste delle corsie supplementari per immagazzinare lo stesso numero di unità di carico, abbassando il tempo necessario alla macchina R/S per il prelievo, ma aumentando il volume refrigerato. Tuttavia, il vantaggio principale è che non sono richiesti rimescolamenti quando i camion devono essere caricati.

### 1.1.2 Live-Cube compact storage system

Una delle ultime evoluzioni dei magazzini super intensivi sono i sistemi "Live-cube". Tale struttura permette di raggiungere una capacità di immagazzinamento ad elevata densità unita a dei tempi di risposta brevi. Il sistema Live-Cube presenta delle griglie di stoccaggio distribuite su più livelli, delle navette, un ascensore un punto di deposito (o I/O). Su ogni livello tutte le unità di carico sono posizionate su navette che possono muoversi nelle direzioni *x* e *y* (purché vi sia un vano vuoto). Un ascensore si occupa dei movimenti tra i diversi livelli in direzione *z* (fig. 1.3). Solitamente si assume che il punto di I /O sia nell'angolo in basso a sinistra del sistema. Quando inattivo, l'ascensore attende nel punto di deposito. Rispetto ad altri tipi di magazzini compatti, un sistema Live-Cube ha un vantaggio importante: l'indipendenza dei movimenti nello spazio tridimensionale. L'ascensore si muove indipendente dalle navette e le stesse navette si muovono indipendentemente all'interno dei vari livelli. E' possibile muovere più navette contemporaneamente nello stesso livello, in modo coordinato, finché uno spazio vuoto è presente. A questo proposito, lo spostamento di un dato carico su una navetta in una certa posizione è paragonabile alla soluzione del gioco proposto da Sam Loyd 15-puzzle. Questo rende il sistema flessibile e permette di ottenere un tempo di reazione per espletare le richieste breve. Inoltre si può ottenere un elevata densità di stoccaggio in quanto le navate non sono necessarie. I magazzini Live-Cube hanno trovato diverse applicazioni, anche se alcune ancora in fase pilota, come in sistemi di parcheggio (ad esempio, "Park, Swipe, Leave"

parcheggi automatizzato (Automotion Parking Systems, 2011, 2011“Space Parking Optimization Technology” or SPOT (Eweco, 2011), “Hyundai Integrated Parking” oppure HIP Systems (Hyundai Elevator, 2011), “Wohr Parksafe” (Wohr, 2011)). Si applicano anche nei magazzini e sistemi cross-dock (ad esempio "Magic Black Box" (ODTH, 2011)), container (ad esempio "Ultra-high Container Warehouse" o UCW systems (EZ-Indus, 2011)), e la gestione sanitaria (ad esempio “pharmacy storage and retrieval systems "(Swisslog, 2011)).

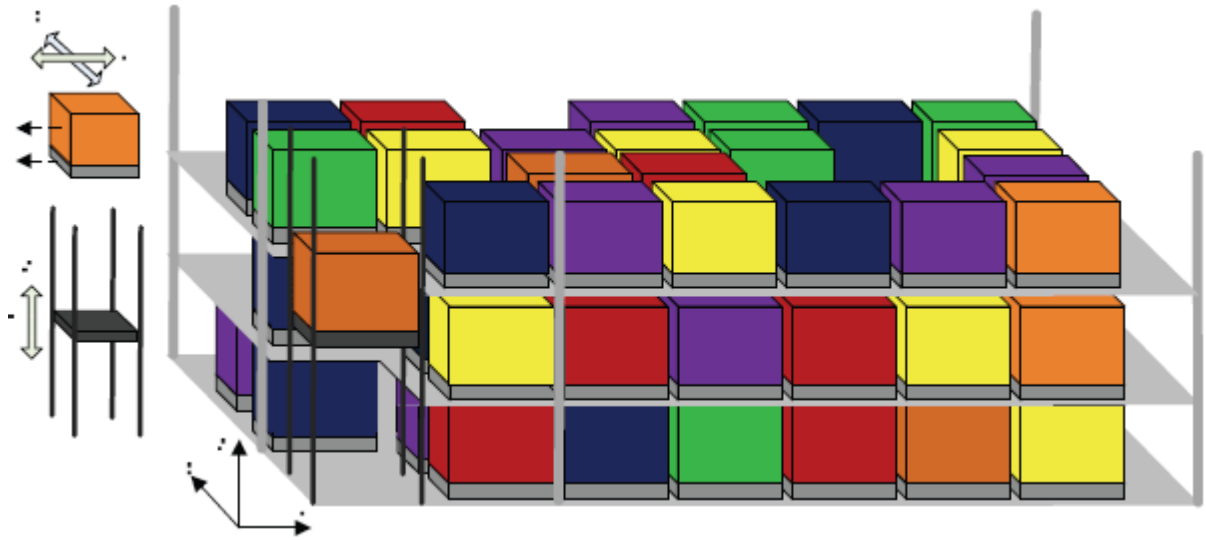

***Figura 1.3.*** *Magazzino Live-Cube schematizzato.*

Nei magazzini intensivi tradizionali, i veicoli che trasportano le unità di carico unità che devono essere depositate o recuperate, necessitano di corridoi per potersi spostare. Questi corridoi occupano molto spazio che potrebbe essere utilizzato per stoccare la merce. I magazzini ad elevata intensità sono stati introdotti per aumentare la densità di stoccaggio. Tali implementazioni permettono di abbassare il volume del magazzino riducendo così investimenti e costi operativi (Gue e Kim, 2007). L’ovvia conseguenza è che una nuova generazione di sistemi di stoccaggio sta emergendo: i magazzini compatti “Live-Cube”. In un sistema di stoccaggio compatto Live-Cube, è possibile ottenere la densità di immagazzinamento massima in quanto praticamente non è necessario nessun movimento in uno spazio vuoto. Come già accennato nell’introduzione, ridurre l’area calpestabile da dedicare al magazzino è particolarmente importante in luoghi in cui le aree disponibili scarseggiano. I sistemi Live-Cube possono rispondere velocemente alle richieste dei clienti grazie a movimenti simultanei e di collaborazione tra i diversi componenti. Tuttavia, proprio l’alta densità di stoccaggio, potrebbe portare a tempi di risposta lunghi a causa dell’interferenza tra le unità di carico.

Data la novità e la complessità dei magazzini Live-Cube, la ricerca è non ha ancora approfondito le

varie tematiche e ci sono alcune domande fondamentali che ancora attendono una risposta, tra cui:
1. Qual è la performance di un sistema di compatto live-cube?
2. Qual è l'impatto delle dimensioni del sistema sulle prestazioni del sistema?

Zaepur (2004) si propone di rispondere a queste due domande. Le navette possono muoversi in direzioni *x* ed y mentre trasportano un carico unitario. Ogni carico unitario contiene un solo tipo di prodotto. Tutti i vani di stoccaggio e le unità di carico sono standard e hanno la stessa dimensione. Pertanto, tutte le posizioni di stoccaggio possono essere utilizzate per depositare unità di carico. Le navette muovono simultaneamente le unità di carico nelle posizioni vuote (almeno una posizione vuota necessario su ogni livello) per spostare l'unità di carico desiderata verso l'ascensore.
Un ascensore facilita i movimenti delle unità di carico tra i vari livelli in direzione *z*.
Le navette possono muoversi in modo indipendente rispetto all'ascensore. Solitamente il punto di I /O viene posto nell'angolo in basso a sinistra del sistema (al piano terra) e viene assunte un criterio di archiviazione random, il che implica che ogni sede ha la stessa probabilità di contenere il carico unitario richiesto. Il criterio di archiviazione random è ampiamente studiato in letteratura (ad esempio, Hausman et al., 1976 Bozer e Bianco 1984, Lee e Elsayed, 2005 De Koster et al., 2008). Lo stoccaggio casuale richiede meno dati, poiché nessuna informazione sul prodotto viene utilizzata per determinare l'assegnazione del vano di deposito (Goetschalckx e Ratliff, 1990). Inoltre, lo stoccaggio casuale viene spesso utilizzato come elemento di confronto per il tempo di risposta del sistema con altri criteri di archiviazione ( Hausman et al., 1976 e Lee e Elsayed, 2005).

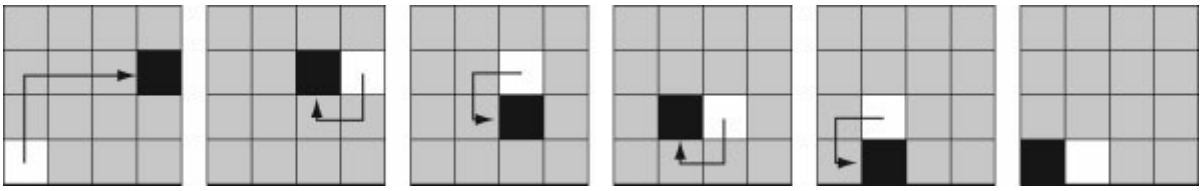

***Figura 1.4.*** *Schematizzazione dei movimenti in un magazzino. La casella bianca (postazione vuota) guida la tessera nera (unità di carico richiesta) alla postazione di I/O.*

Gue e Kim, 2007, hanno proposto un sistema live-cube ad un livello detto "puzzle-based storage system". E' un sistema fisico di stoccaggio merci basato sul 15-puzzle, un classico gioco per bambini in cui 15 tessere numerate scorrono all'interno di una griglia di 4 × 4. L'obiettivo del gioco è quello di risistemare le mattonelle in sequenza numerica, partendo da una disposizione casuale. Dal punto di vista logistico, le tessere rappresentano borse, pallet, o anche contenitori che devono essere immagazzinati puntando ad elevata densità, e l'obiettivo è quello di manovrare gli elementi ad un punto di ingresso-uscita per il recupero o la trasformazione. Vi può essere una sola posizione vuote come nel gioco, oppure più di una per facilitare le movimentazioni. Si possono anche

disegnare magazzini puzzle-based con molti vani vuoti posizionati in modo da sembrare corsie, cosicché da poter confrontarli con i tradizionali magazzini con navate.

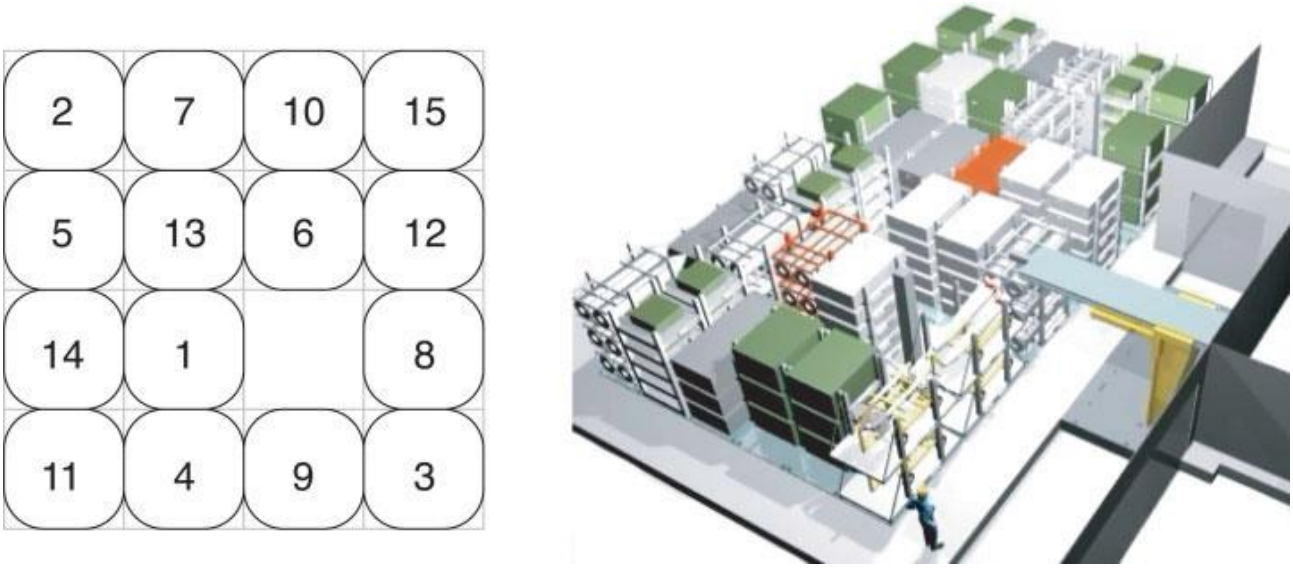


***Figura 1.5**. A sinistra si può vedere il classico gioco 15-puzzle, mentre a destra vi è una rappresentazione virtuale di NAVISTORS, un magazzino puzzle-based 6x6 implementato per la marina statunitense.*

Il problema maggiormente affrontato in letteratura, per quanto riguarda il 15-puzzle, è di organizzare le piastrelle del puzzle in una certa sequenza, a partire da un'altra configurazione. Nel caso venga visto come un deposito merci fisico, invece, il problema da risolvere risulta essere più semplice: come muovere le caselle per recuperare un oggetto il più rapidamente possibile. In altre parole, non si è più interessati alla disposizione interna degli elementi nella griglia, ma solo alla posizione e al movimento di un particolare elemento richiesto. Il secondo step è analizzare il problema legato alla pianificazione di movimento del robot, ma questo è ampiamente trattato in letteratura.

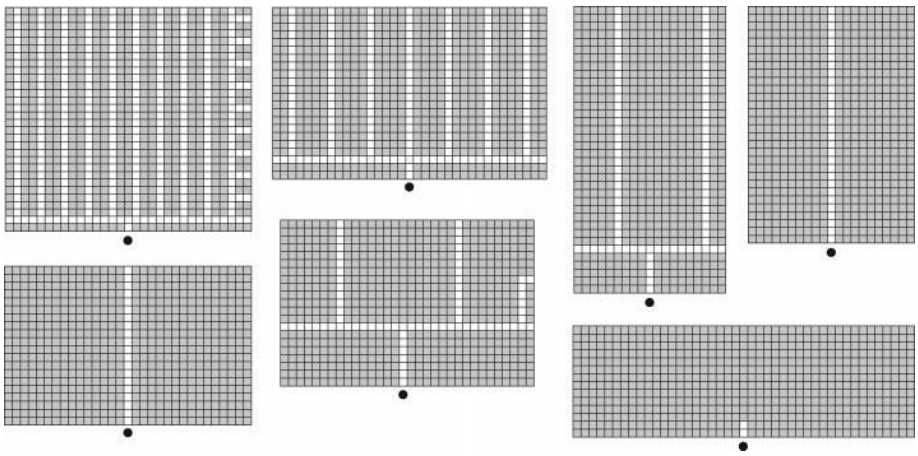

***Figura 1.6.*** *Vari esempi di come si possa organizzare un magazzino composto da seicento caselle. Il punto nero rappresenta il punto di I/O.*

Di particolare interesse, per capire e analizzare i problemi di un magazzino, è il puzzle Rush Hour, dove l'obiettivo è quello di spostare un particolare pezzo da una parte all'altra della scacchiera, che è simile all'obiettivo perseguito nei magazzini compatti e questo richiede movimento interferendo voci fuori del modo. "I veicoli" possono occupare due quadrati della griglia (un "auto") o tre piazze (un "camion"), e può spostarsi verticalmente o orizzontalmente, ma non entrambi. Il che è più complesso da gestire rispetto ad un magazzino ad alta intensità in quanto le unità di carico hanno una dimensione standard, e ciascuna può muoversi in qualsiasi direzione.

***Figura 1.7.*** *Esempio di una griglia di Rush Hour®.*

### 1.1.3 Conveyor-based system

Tra le diverse tecnologie implementate per i sistemi di stoccaggio compatti, con diversi sistemi di movimentazione per i movimenti in verticale, orizzontale e profondità, le più semplici sono le due varianti che utilizzano trasportatori per spostare i pallet in profondità. Detti "conveyor-based system" si dividono in due sotto-categorie: una con trasportatori a gravità e l'altra con trasportatori motorizzati. In letteratura vi sono vari articoli che affrontano le tematiche legate ai magazzini intensivi con trasportatori, come il calcolo del tempo di movimentazione, il calcolo delle dimensioni ottimali per minimizzare il tempo di viaggio con una strategia di immagazzinamento randomizzata con una data capacità di stoccaggio del sistema (Yu and De Koster, 2009b; De Koster et al., 2008). Il sistema con trasportatori è schematizzato in figura 1.8. Esso si compone di una gru di deposito/recupero (S/R) che si occupa dei movimenti dei pallet in direzione orizzontale e verticale (la gru S/R può guidare e sollevare contemporaneamente). Il trasportatore invece si occupa del movimento in profondità. I trasportatori lavorano a coppie, se una unità di carico è presente su un

convogliatore di flusso in entrata (che sia per gravità o alimentato non fa differenza) all'estremità posteriore della scaffalatura, contemporaneamente sulla linea vicina una unità in carico è presente alla fine del flusso in uscita, sulla parte anteriore del telaio ed è pronta ad essere fermata nella posizione di recupero della macchina S/R.

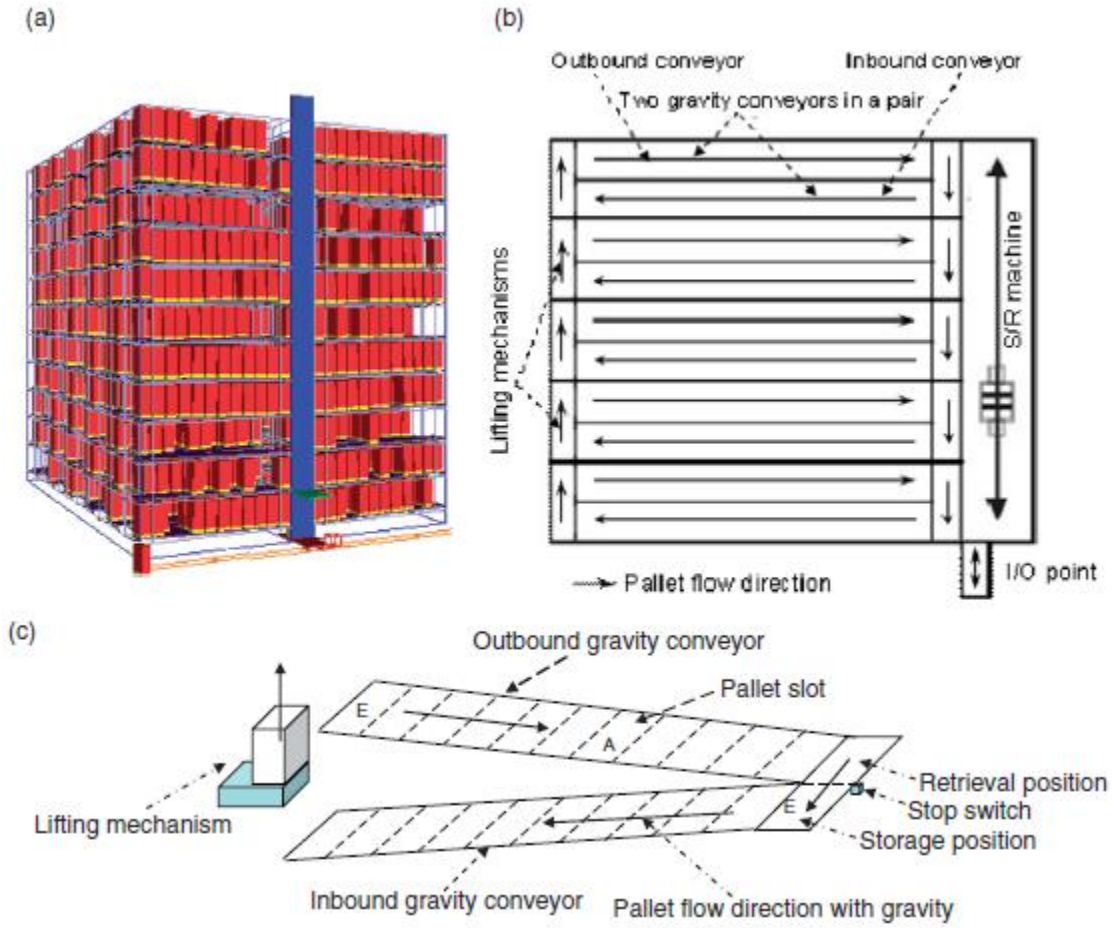


***Figura 1.8.*** *Magazzino compatto con trasportatori a coppie. (a) vista generale. (b) vista dall'alto. (c) schema di funzionamento per trasportatori a gravità.*

Le unità di carico entrano ed escono dal sistema attraverso il punto di I/O e sono stoccate nello scaffale prescelto. La macchina S/R raccoglie le UdC dal punto di I/O per portarle ad un trasportatore in entrata o li recupera da un nastro trasportatore in uscita per portarle al punto di I / O. Dalla figura 1.8 (b), si può vedere come ci siano molti nastri trasportatori a gravità che lavorano a coppie ad ogni livello del magazzino. Per ogni coppia di trasportatori a gravità, un interruttore di arresto è necessario sul lato anteriore dello scaffale per fermare un carico unitario si è in procinto di recuperarlo come rappresentato nella figura 1.8 (c) (dove la pendenza è esagerata per motivi descrittivi). I due trasportatori a gravità hanno gli stessi angoli di inclinazione assoluti (uno è negativo e l'altro è positivo) e lavorano a coppie. Sul trasportatore in entrata, i carichi unitari fluiscono all'estremità posteriore dello scaffale per gravità. Sul retro della struttura un semplice ed

economico meccanismo di sollevamento eleva le unità di carico una ad una dal nastro in entrata verso il convogliatore in uscita superiore da cui scorre verso l'estremità anteriore del magazzino per gravità. In questo modo le unità di carico sui due trasportatori possono ruotare continuamente fino a che quella richiesta raggiunge la posizione S/R. L'ascensore determina la velocità di rotazione effettiva dei vani dato che è più lento rispetto ai suoi due nastri trasportatori.
Analizzando la variante non motorizzata, si può notare che a causa della gravità e della pendenza dei trasportatori, lo slot "E" sul trasportatore in uscita dovrà rimanere vuoto quando l'interruttore è spento, mentre almeno una dei due slot, contrassegnati con "E" nella posizione di I/O sarà vuoto quando il sistema è acceso. Nel caso in cui si debba recuperare una unità di carico posizionata nello slot “A” al momento della richiesta, i pallet a valle dovranno essere movimentati in modo tale che la UdC “A” possa fluire fino a e fermarsi nella posizione di recupero. A tale scopo, l'interruttore di arresto viene disattivato per lasciare che i pallet scorrano sui due convogliatori e fare spazio sullo slot “E” alla fine del trasportatore in uscita.
Fondamentale in tali magazzini è il meccanismo di sollevamento che quando viene azionato permette ai pallet di scorrere sui due convogliatori in modo continuo. Questo processo si ripete fino a che l’unità di carico “A” non raggiunge la posizione di recupero, dopo si attiva l’interruttore di stop.
Il sistema con trasportatori motorizzati non utilizza un ascensore e trasportatori sono installati nello scaffale orizzontalmente. L'operazione di recupero è identica a quella già vista per i magazzini a gravità, ma per quanto riguarda lo stoccaggio ci sono due differenze nel funzionamento. In primo luogo, gli slot vuoti possono essere in qualsiasi posizione lungo i due trasportatori. In secondo luogo, il tempo di stoccaggio di una unità di carico può essere più lungo rispetto al caso di trasportatori a gravità in quanto quelli alimentati hanno bisogno di ruotare fino a raggiungere la posizione con il vano vuoto adatto al deposito.
Oltre ai già citati vantaggi dei magazzini compatti, la capacità di capacità di stoccaggio con ingombri limitati, il sistema con trasportatori a gravità è innovativo e soprattutto poco costoso, ed è sufficiente un interruttore di arresto nel convogliatore anteriore per fermare un carico unitario quando è necessario il recupero della UdC. In più in caso di trasportatori a gravità, il sistema è dotato di un economico e semplice meccanismo di sollevamento sul lato posteriore della scaffalatura, il cui compito è sollevare carichi unitari uno ad uno dal trasportatore in entrata verso il convogliatore in uscita al livello superiore. In questo modo le unità di carico sui due trasportatori possono ruotare fino a quando quella richiesta non viene fermata sulla posizione di arresto. L'ascensore fa ruotare l'unità di carico e, in quanto elemento lento del sistema, determina la velocità di rotazione effettiva. Si ricorda che per il corretto funzionamento al fine di recuperare un

pallet, i due trasportatori a gravità confinanti dovrebbero avere almeno uno slot vuoto.
Dato che i trasportatori in entrata e in uscita hanno solo lievi pendenze, e sono disposti con angoli uguali, l'altezza totale dello scaffale aumenta solo lievemente rispetto al sistema che utilizza trasportatori motorizzati.
Il sistema che utilizza convogliatori motorizzati non ha bisogno di impianti di risalita, ma utilizza trasportatori più costosi e non così semplici da riparare in caso di guasto. Un vantaggio di questo tipo di magazzino è che gli scaffali possono avere una profondità maggiore rispetto ai sistemi che utilizzano la gravità per la movimentazione dei pallet.
Per quanto riguarda il tempo i attraversamento questi tipi di magazzino, al fine di ottenere il tempo ciclo previsto per entrambe le varianti, si considera solo il tempo necessario per il recupero. Questa considerazione è motivata anche dal fatto che il recupero è la più critica delle operazioni.
Diversi criteri di archiviazione vengono utilizzati per stoccare le UdC, tra le quali si ricordato il sistema random e i criteri di archiviazione dedicati (comprese le politiche basate sul full-turnover). Nel quadro della politica di archiviazione casuale, ogni unità di carico ha la stessa probabilità di essere conservata in una dei vani. In realtà, in genere alcuni elementi sono richiesti più frequentemente di altri, come descritto da una curva ABC. Il criterio che si basa sul full-turnover prevede che le unità di carico vengano posizionate a distanza decrescente man mano che aumenta la frequenza di movimentazione, e questo permette di diminuire il tempo di viaggio della macchina (Hausman et al. 1976, Parco et al. 2003).
Nei magazzini 3D AS/RS già studiati, la politica basata sul fatturato stocca gli elementi con sequenza assegnata. Durante il processo di deposito e di recupero, la sequenza di stoccaggio delle unità di carico può essere distorta, ma anche facilmente ripristinata grazie ai movimento della macchina S/R e dei trasportatori che possono rimescolare le unità di carico secondo le loro frequenze di fatturato quando la macchina S/R è inattiva.
Calcolare il tempo di attraversamento o, in alternativa, il tempo di ciclo del singolo comando, è uno dei problemi principali nella progettazione di un sistema compatto, e anche nel valutare le singole operazioni del sistema. Il tempo di attraversamento dipende dalla velocità di movimentazione dei materiali e dalla efficienza, ma anche dalle dimensioni del sistema, dal punto di sosta delle gru, e dai criteri di deposito e recupero. Questo problema è stato affrontato per sistemi 2D in grande misura (Hausman et al. 1976 Sarker e Babu 1995 Koh et al. 2002), mentre la letteratura sui sistemi 3D è tutt'altro che abbondante (Yugang Yu & M.B.M. de Koster (2009)).
Le possibili aree di applicazione dei magazzini 3D sono le più disparate, dai classici impianti per le materie prime alle aree innovative. La completa automazione dei compiti e la grande capacità di archiviazione in un spazio compatto e cubico può rendere tali sistemi più veloci rispetto ai

tradizionali sistemi AS/RS a singola profondità. Un esempio è il progetto Distrivaart nei Paesi Bassi (Waals 2005), dove i pallet vengono trasportati da mezzo chiatta tra più fornitori e i magazzini di un supermercato. Il risultato di questo è stata la piena automatizzazione della procedura di immagazzinamento intensivo sulla chiatta. Un altro esempio di un sistema compatto può essere trovato alla Miele a Gutersloh, in Germania, dove una combinazione di gru e navette deposita e recuperare singoli elettrodomestici indicati come unità di carico, come lavatrici e lavastoviglie, e la sequenza automatica di carico per treni e rimorchi. Altri esempi di magazzini compatti 3D realizzati possono essere trovati nei rispettivi siti web di aziende come Siemens Dematic, Viscon FlexCom, Westfalia e Retrotech. Il risultato è che i sistemi AS/RSs abbinati ad un magazzino compatto 3d sono divenuti sempre più popolari (Van den Berg e Gademann 2000 Hu et al. 2005).

### 1.1.4 AVS/R

I recenti progressi effettuati dalle tecnologie legate ai veicoli autonomi (AV) permettono di ridurre drasticamente i costi per l'implementazione di sistemi di stoccaggio per unità di carico. Se questa tecnologia vuole conquistare fette sempre più importati di mercato, i fornitori di sistemi di tecnologie AV devono dimostrare i benefici legati alle prestazioni e alla convenienza economica per conquistare acquirenti. Questo non è ancora avvenuto per due motivi principali. I fornitori, attuali e potenziali, di AV per magazzini ad unità di carico devono affrontare un divario netto tra lo stato avanzato della tecnologia hardware e il sistema di controllo, e quello della concettualizzazione del design modello necessario per valutare l'impatto di questa tecnologia sulle varie operazioni di deposito e prelievo.

La mancanza di modelli analitici, i primi sono apparsi nei primi anni 2000 (Kuo P.H. et. altri, 2002), per prevedere le prestazioni del sistema è stato un ostacolo quasi insormontabile per la diffusione dei sistemi AVS/RS che presentano un tempo di attraversamento piuttosto basso rispetto alla capacità di stoccaggio. La seconda la ragione è una cultura aziendale di avversione al rischio tra gli operatori nel campo dei magazzini automatici per unità di carico, fatto che esercita notevole pressione del tempo e incertezza sul processo di selezione della tecnologia (Kuo, 2007).

Per quanto riguarda il funzionamento, questi magazzini presentano una unità di carico mossa tramite un sistema AVS/RS mediante movimenti rettilinei guidate dai modelli AV, ma utilizzando delle guide ferroviarie tridimensionali. Nei sistemi basati sui sollevatori tradizionali, i carichi vengono trasportati lungo i corridoi da gru che si muovono simultaneamente nelle dimensioni orizzontali e verticali. La figura 1.9 riassume le differenze principali tra magazzini basati sui sistemi di sollevazione tradizionali e quelli automatizzati basati sulle tecnologie AV.

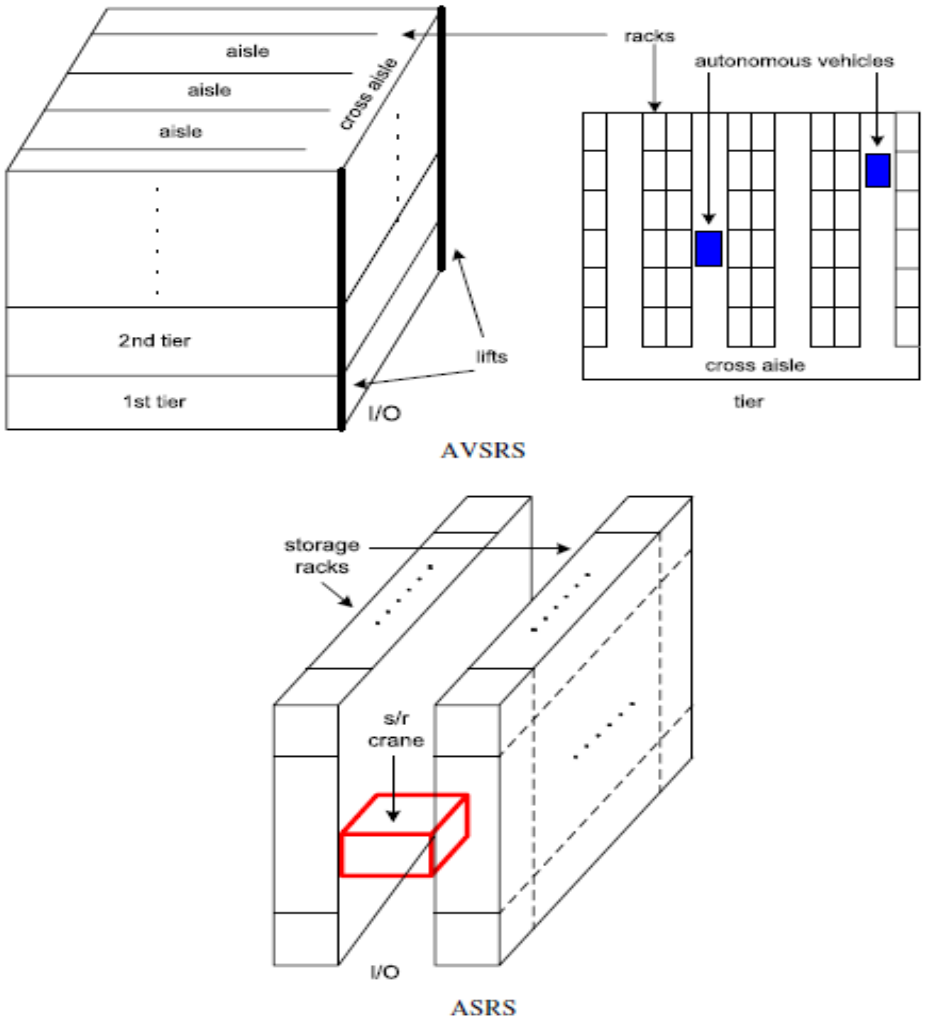


***Figura 1.9.*** *Differenze principali tra un sistema AVS/RS e uno AS/RS.*

I principali componenti di un magazzino basato su tecnologia AVS/RS sono illustrati in figura 1.10 compresi i meccanismi di sollevamento che sono montati lungo gli estremi della scaffalatura per fornire il movimento verticale. Il costo dominate associato agli AVS/RS è associato ai veicoli. Il costo unitario degli ascensori è pari a circa il 25% rispetto a quello dei veicoli con costi unitari legati alla scaffalatura comparabili con quelli delle altre tecnologie automatizzate S/R.
Analizzati questi rapporti di costo, si può dire che gli ascensori non sono in genere un collo di bottiglia in tali magazzini, ma hanno una notevole influenza sulla capacità di flusso in quanto il movimento verticale è generalmente più lento di quello orizzontale e può diventare pesante in riferimento a tempi di ciclo delle transazioni. Anche a causa di considerazioni di costo del capitale, la politica di stoccaggio più utilizzata nei magazzini automatizzati con sistemi S/R per unità di carico è quella random (Tomkins, J.A., Bozer, Y, 2003). Utilizzando un criterio di archiviazione casuale la posizione di un carico specifico in un sistema di stoccaggio è una variabile casuale nel

tempo. Una regola di posizionamento tipica, utilizzata con lo storage casuale, è di assegnare carichi in entrata al vano disponibile più vicino al punto di I/O. Questa politica permette di risparmiare spazio, massimizzando il tasso di occupazione, consentendo a unità di carico di natura diversa di occupare gli stessi indirizzi in momenti temporali diversi.

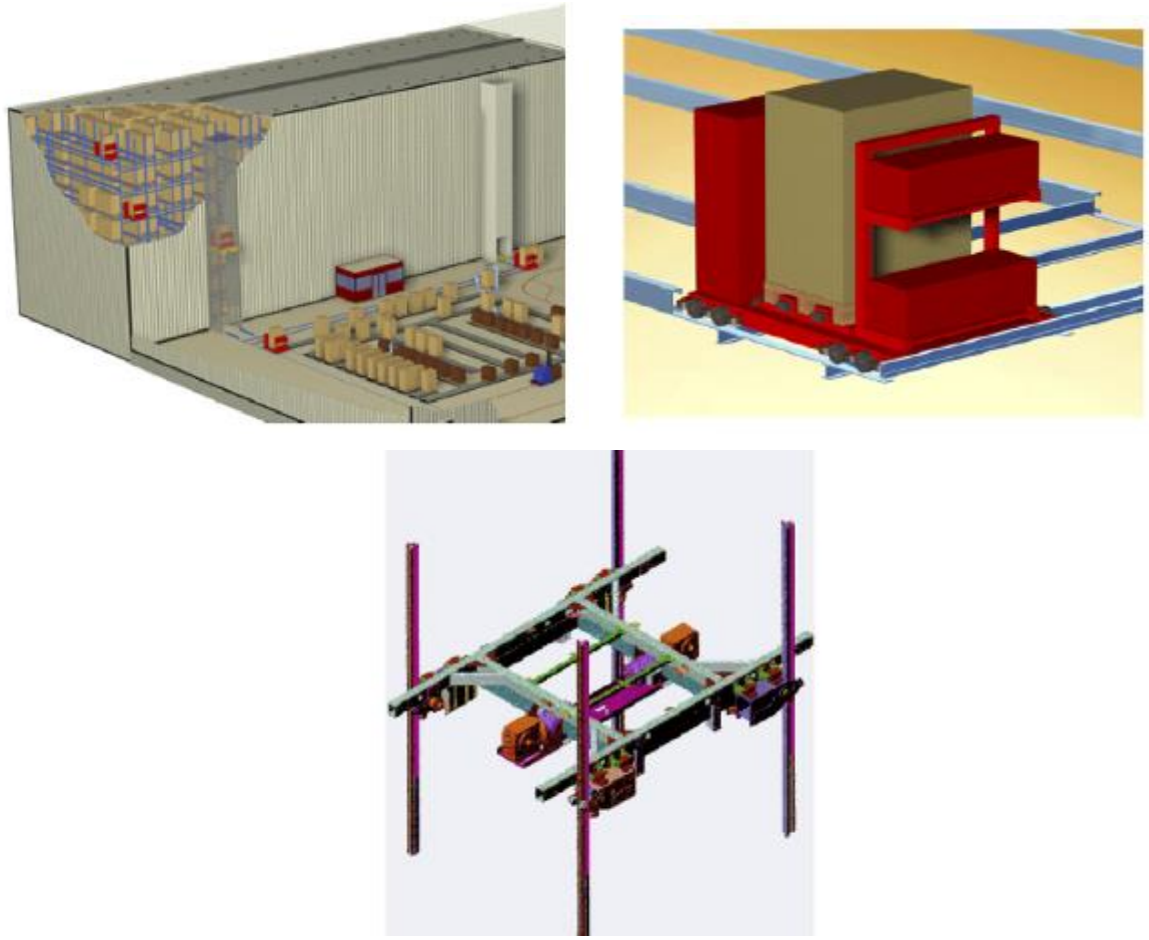

***Figura 1.10**. Componenti di un sistema AVS/R, compresi rotaie e ascensore.*

La tecnologia AV può risultare conveniente nell'automazione dei sistemi ULS/R a bassi volumi di transazioni in quanto permette al progettista di variare il numero di dispositivi di deposito/recupero in base al livello di operazioni S/R richiesto in un dato sistema. Con la tecnologia basata sui sistemi di traslazione tradizionale, i dispositivi S/R utilizzano altamente gli efficienti schemi di movimento Chebychev all'interno navate. Tuttavia, il costo elevato dei sistemi che utilizzano gru innalza la soglia per la quale l'automazione risulta conveniente anche dal momento che molti magazzini hanno restrizioni che limitano in profondità e altezza le navate, oppure richiedono alti volumi di stoccaggio mentre il numero di viaggi richiesti risulta limitato. I modelli utilizzati per i viaggi in un sistema AVS/R dipendono dalle posizioni di risalita lungo la periferia dello scaffale. Solitamente si presume che tutti gli ascensori siano co-situati in prossimità del punto situato nell'angolo anteriore sinistro dello scaffale, e che il punto di trasferimento alla zona di buffer di carico, o punto di I/O, si

trovi nello stesso angolo del primo livello. Questa ipotesi è fatta per semplicità analitica e può essere facilmente modificata se le posizioni di sollevamento sono una variabile decisionale.
Dato che la maggior parte delle regolamentazione dei magazzini AVS/RS punta a conservare le ore di funzionamento dei veicoli e a non modificare il volume di deposito, la politica per il punto di sosta point-of-service-completion (POSC) è la regola preferita per il controllo dei veicoli.
Nell'ambito di questo tipo di politica, i veicoli si fermano nel punto in cui completano l'ultima transazione fino a quando non vengono impegnati dalla successiva transazione S/R. Di conseguenza, l'angolo di I/O diventa il punto di sosta del veicolo per cicli relativi alle operazioni di recupero e l'indirizzo di memoria diventa il punto di sosta per i cicli di stoccaggio. Sebbene l'assunzione del punto di trasferimento del carico come punto di sosta possa portare ad una forma analitica molto più semplice per simulazione del funzionamento, la regola POSC è più realistica per le implementazioni poiché è una strategia conservativa.
Negli AVS/R i viaggi del veicolo in direzione orizzontale sono limitati al corridoio trasversale (cross-aisle in figura 1.9) e alle navate munite di binari integrate negli scaffali. Tale struttura impone schemi di movimento orizzontale piuttosto inefficienti dato che includono traiettorie di ritorno all'interno dei singoli corridoi poiché, tipicamente, vi è una sola navata trasversale per un dato livello del magazzino. Quest'ultima limitazione, unita al fatto che gli AV sono in un sistema in grado di raggiungere tutti i vani, nega importanti principi di progettazione che sono applicabili con la maggior parte dei sistemi crane-based. Ad esempio, la natura sequenziale della movimentazione degli AV in tutti e tre le dimensioni e gli effetti dovuti a potenziali interferenze tra i veicoli minano il principio di design 'square-in-time' per gli scaffali che si basa su schemi di movimento senza restrizioni di Chebychev.

## 1.2 Sistemi innovativi per contenitori

Nella sezione precedente sono stati introdotti i sistemi dedicati all'immagazzinamento di pallet, ma unità di carico di piccole dimensioni come scatole, vassoi e cartoni rappresentano il presente e il futuro prossimo dei sistemi per lo stoccaggio della merce, i magazzini automatici che utilizzano sistemi innovativi come la tecnologia AVS/RS sono ancora poco diffusi, ma le aziende distributrici di logistica stanno sviluppando i loro sistemi e le loro macchine per proporre ai clienti soluzioni a costi accessibili in grado di soddisfare le numerose esigenze di mercato. I sistemi per contenitori si possono suddividere in:

- Sistemi automatizzati con veicoli per contenitori ad alta movimentazione.
- Sistemi automatizzati con veicoli per contenitori non ad alta movimentazione.
- Sistemi automatizzati di stoccaggio con 3D robot.

- Sistemi automatizzati con scaffali mobili.

### 1.2.1 Sistemi automatizzati con veicoli per contenitori ad alta movimentazione

I sistemi automatici per contenitori con veicoli ad alta movimentazione consentono lo stoccaggio e il prelievo di contenitori in plastica, scatole, vassoi e cartoni, e consentono di integrare al meglio le zone di stoccaggio della merce con le postazioni di picking riducendo di molto i tempi di evasioni degli ordini. Con l'adozione di queste soluzioni aumenta decisamente l'efficienza dell'operazione di picking, raggiungendo valori elevati e riducendo i costi complessivi delle operazioni.
Un sistema di stoccaggio e prelievo molto rapido rende possibile ordinare e raggruppare gli ordini come richiesto dalla spedizione molto più velocemente, più accuratamente e in modo più flessibile rispetto ad una soluzione manuale. Inoltre, può lavorare anche durante la notte se necessario, con prestazioni ottimizzate.

La caratteristica fondamentale di questi sistemi è il completo disaccoppiamento del trasporto orizzontale e verticale delle unità di carico. Gli shuttle nella configurazione *tier captive* sono assegnati ad uno specifico livello, nella configurazione *tier to tier* invece si possono muovere tra i vari livelli mediante un ascensore.

Per quanto riguarda il layout, tali sistemi consentono permettono di non considerare un corridoio di collegamento ad ogni livello della scaffalatura e quindi in termini di tecnologia, di non dover disporre di veicoli sterzanti, poiché questi non devono spostarsi all'interno del livello (figura 1.11).

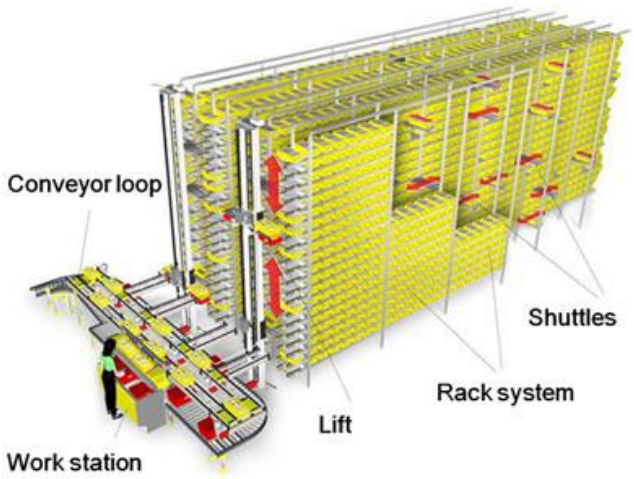


***Figura 1.11.*** *Configurazione di un sistema OPS.*

Le performance dei sistemi così implementati sono molto elevate e consentono di soddisfare tutte le esigenze di un sistema di stoccaggio per oggetti di medio/piccole dimensioni che richiedono tempi di allestimento ordini brevi (tipico è il settore farmaceutico), alta capacità di stoccaggio e alta potenzialità di movimentazione.

Il consumo energetico di questi sistemi è molto minore rispetto ai tradizionali miniload poiché il peso degli shuttle è di molto inferiore rispetto all'intera struttura di un traslo-elevatore.
Il costo di installazione di un magazzino con questo sistema di movimentazione colli è maggiore rispetto ad un normale sistema di stoccaggio servito da tradizionali traslo-elevatori.

Allo stesso tempo questa soluzione garantisce il vantaggio di poter comodamente costruire il sistema su misura per rispondere perfettamente alle esigenze dei clienti e consentire altresì di ampliare la configurazione in maniera molto semplice minimizzando le eventuali interferenze con le attività in corso. Nel caso in cui fosse invece necessario aumentare la capacità di stoccaggio è sufficiente aggiungere una nuova scaffalatura senza nessun altro macchinario. Il vantaggio evidente è quello di poter usufruire di un sistema automatico ad alta efficienza e redditività con un investimento iniziale ridotto.

L'alta modularità e flessibilità di configurazione consente inoltre di adeguarsi a qualsiasi processo di prelievo ed ambiente di lavoro.

In sintesi soluzioni di questo tipo offrono i seguenti vantaggi:

- Potenzialità di movimentazione maggiore rispetto al classico trasloelavatore per miniload.
- Più alto coefficiente di utilizzazione volumetrica, in quanto non richiede spazio per il posizionamento della rotaia.
- Possibilità di evitare il ri-sequenziamento in baia, impostando il prelievo secondo la sequenza desiderata, utilizzando il sistema come buffer di spedizione e/o sequenziatore: in particolare, i veicoli prelevano in un qualsiasi ordine i vassoi per evadere un batch di ordini e la sequenza viene costruita dagli elevatori.
- Possibilità di effettuare le attività di manutenzione o sostituzione dei veicoli senza arrestare il sistema.

Tra le varie soluzioni che sono presenti sul mercato, particolare interesse hanno suscitato il sistema OSR (order storage & retrieval system) proposto da Knapp e primo ad comparire sul mercato; Adapto delle Vanderlande Industries caratterizzato da shuttle molto leggeri che possono cambiare livello e corridoio raggiungendo quindi qualsiasi locazione di deposito; HDS di Quickstore dove i veicoli possono muoversi sia in veriticale che orizzontalmente, eliminando l'elevatore e il conseguente problema di caricare le navette sullo stesso; Multischuttle 2 di Dematic che grazie alla progettazione di braccetti telescopici posizionati sui veicoli permette di installare scaffalature a doppia profondità, Smart Carrier di Swisslog dedicato a carichi molto leggeri e con un sistema di

recupero dell'energia in frenata che gli permette di consumare fino al 60% in meno e Duosys di Daifuku il quale utilizza un AS/RS molto veloce.

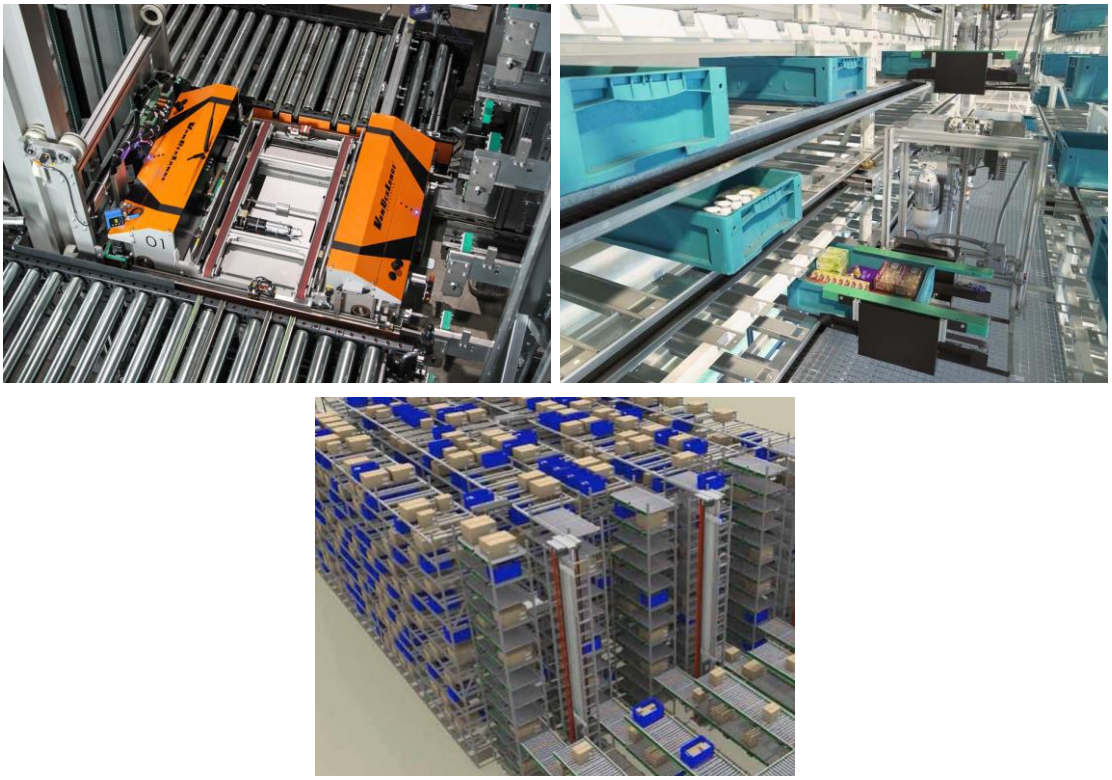

***Figura 1.12.*** *A partire dall'angolo in alto a sinistra e in senso orario: esempio di shuttle, in particolare lo shuttle Adapto caricato sull'elevatore; veicolo con braccetti del sistema HDS di Quickstore; configurazione di impianto con Dematic Multishuttle 2.*

### 1.2.2 Sistemi automatizzati con veicoli per contenitori non ad alta movimentazione

Questo tipo di soluzione è l'equivalente dei sistemi AVS/RS già descritti precedentemente (paragrafo 1.1.4), ed unisce un sistema di trasporto autonomo con la logistica dei contenitori dei magazzini miniload.

Il sistema shuttle così risultante è particolarmente adatto ad implementazioni vicine alla produzione o ai centri di assemblaggio, ad esempio come buffer o per il rifornimento completamente automatico di postazioni di lavoro. L'elevata flessibilità lo rende utilizzabile anche nei centri logistici. Il sistema di scaffali si adegua con facilità alle strutture preesistenti, mentre la sua scalabilità consente l'integrazione rapida ed agevole di shuttle e scaffali a seconda delle esigenze dell'azienda e del mercato. I veicoli automatici detti AiV (Autonomous Intelligent Vehicle) traslano all'interno della scaffalatura senza limitazioni di livello, si riconoscono a vicenda, rispettano le regole di precedenza e i sensi unici, e svolgono il lavoro in maniera completamente autonoma, senza alcun intervento o coordinazione da parte di un computer centrale.

Gli shuttle montano ruote orientabili adatte sia per la logistica di magazzino che per quella di

trasporto e sono in grado di compiere sia cicli semplici che combinati e di individuare il percorso più idoneo tra gli scaffali.
Il numero dei veicoli AiV cosi come il numero degli ascensori è variabile ed è definito in fase di progettazione a seconda della potenzialità richiesta dall'impianto.
L'azienda che per prima ha proposto e sviluppato questo tipo di soluzione e ha introdotto nel mercato questi sistemi è l'azienda Ylog, che si presenta come una impresa indipendente e in cooperazione con Knapp AG. Ylog Industry Solutions punta su soluzioni di sistema scalabili per medie imprese. Sviluppo e produzione vengono effettuati nella sede centrale in Austria. I veicoli di Ylog (figura 1.17) sono in grado di ricaricarsi autonomamente durante il funzionamento poiché sono alimentati, invece che dalle tradizionali batterie, da "supercondensatori". Ogni shuttle conta complessivamente nove motori, di cui 4 servono per fare curvare i veicoli robotizzati le cui caratteristiche tecniche principali sono il peso (50 kg) e la potenza del singolo shuttle (100W, pari a un duecentesimo di quella di un traslo-elevatore per miniload).

*Figura 1.17. Shuttle AiV di Ylog*

### 1.2.3 Sistemi automatizzati di stoccaggio con "3D robot"

Il campo dei magazzini super intensivi è in continua evoluzione, e a flusso ininterrotto vengono presentate nuove soluzioni dalle aziende del settore. Una delle ultime soluzioni apparse sul mercato logistico è rappresentata dall'innovativo sistema per lo stoccaggio e il picking che ha come caratteristica principale quella di utilizzare piccoli robot in grado di gestire e muoversi all'interno del centro di distribuzione in tutte le direzioni sia orizzontalmente che verticalmente.
Analogamente agli altri sistemi compatti, questa soluzione automatica permette di recuperare lo spazio occupato dalle aree dedicate alle corsie e all'handling. Questo sistema, ottimizzato per i carichi leggeri, è basato su una griglia modulare sulla quale traslano i robot in tutte le direzioni per accedere e servire le varie stazioni di picking.
La soluzione proposta da Swisslog unisce elevata modularità e flessibilità: si adatta facilmente agli spazi in edifici già esistenti dato che non richiede grandi altezze, può inglobare colonne e pilastri e,

in base all'evolversi delle esigenze, può aumentare la produttività inserendo nuovi robot e mantenendo inalterata la superficie occupata. La merce viene stoccata in contenitori sovrapposti che vengono gestiti da robot, i quali sono in grado di accedere ad ogni postazione e servire ciascuna stazione di picking. Grazie ad un elevatore, il robot aggancia il contenitore in cima alla colonna, se non è quello richiesto viene riposizionato in cima ad altre corsie di immagazzinamento, poi il robot aggancia il contenitore successivo fino a raggiungere quello richiesto.
Tale soluzione permette di ottenere una elevata densità di stoccaggio a discapito di una bassa selettività, infatti i contenitori sottostanti non sono direttamente accessibili. La massima affidabilità e scalabilità di funzionamento sono garantite dal funzionamento indipendentemente dei robot.

***Figura 1.13.*** *Robot indipendenti 3D Autostore-Swisslog.*

Con una soluzione tecnologica e automatizzata come questa, gli operatori inseriscono semplicemente i contenitori nel cubo di magazzinaggio tramite una o più stazioni riceventi; i robot portano i pezzi agli addetti al prelievo per la selezione e l'evasione dell'ordine e poi riposizionano il materiale rimanente nel posto selezionato a magazzino. Questo processo time-saving, aumenta la produttività ed elimina migliaia di chilometri di movimentazione degli addetti al prelievo in un normale centro di smistamento ordini. La soluzione automatica con robot 3D è stata sviluppata e progettata dall'azienda Swisslog e viene chiamata Autostore (figura 1.10).

***Figura 1.14**. Configurazione impianto Autostore-Swisslog.*

Le caratteristiche tecniche di tale impianto sono:

- altezza massima della griglia: 6.4 m;
- capacita di carico: 30 kg;
- velocità robot: 3 m/s;
- velocità robot lifts: 1.6 m/s;
- accelerazione robot: 0.8 m/s;
- prelievi ora: 50 per ciascun robot;
- capacità di stoccaggio (di un sistema standard): 5 000 - 100 000 contenitori;
- dimensioni dei contenitori: 601 mm x 401 mm x 200 mm/310 mm (a x b x h).

Un sistema completamente diverso, ma che utilizza sempre robot in input e output e permette una elevata densità di stoccaggio è l'I-Collector.
Il sistema i-Collector è costituito da ampie scaffalature suddivise in colonne e righe da apposite guide in cui trasportatori e ascensori progettati internamente scorrono in direzione verticale e orizzontale, come in un puzzle 3D, per evadere un ordine. L'I-Collector è scalabile in altezza e profondità. Solitamente adatto per merci che rimangono in magazzino per un breve periodo, con una rotazione medio-elevata. Grazie alla presenza dei robot sia in input che in output il sistema può evadere completamente un ordine.
I-Collector è un sistema di picking automatico, dinamico ed intelligente che può essere integrato sia in nuovi impianti sia in impianti pre-esistenti.

***Figura 1.15**. Schema dell'I-Collector.*

I-Collector parte da una semplice scaffalatura di magazzinaggio basata su una matrice di guide a strisciamento. Le Unità di Carico (vassoi), riempiti di materiale di varie forme e dimensioni, scorrono su tali guide. A ciascuna estremità della matrice di guide sono presenti dispositivi di presa/traslazione (TD - transfer devices) che possono caricare su di sé più vassoi contemporaneamente. I TD si muovono simultaneamente agendo sulla stessa guida posta all'interno della scaffalatura di magazzinaggio. Una volta giunti in posizione, uno spingitore automatico posizionato sopra al TD spinge i vassoi caricati sul TD stesso all'interno della scaffalatura di magazzinaggio sulla linea di guida a scorrimento. In tal modo un numero uguale di vassoi passa dalla matrice al TD opposto. Tale TD consegna i propri vassoi ad una stazione di prelievo per poi muoversi alla successiva posizione di presa.
I-Collector può essere utilizzato in diverse configurazioni per soddisfare molteplici esigenze di prelievo:

- Batch-in/Mixed out.
- Mixed out/Batch out.
- Mixed-in/Mixed-out.

***Figura 1.18.** Foto di una implementazione di I-Collector*

I risultati che permette di raggiungere l'I-Collector sono:

- Eliminazione del lavoro manuale;
- Riduzione dei costi operativi fino al'80%;
- Alimentazione automatica sul lato ingresso con prelievo automatico sul lato di uscita;
- Nessun errore di conteggio, prelievo e spedizione;
- Eliminazione dei resi;
- Automazione basata su tecnologia collaudata e con risparmio energetico;
- 40 ~ 60% di risparmio in termini di area calpestabile;
- ROI elevato, recupero rapido e maggior margine;
- Evasione degli ordini ottimale e miglioramento del grado di soddisfazione del cliente.

Il sistema I-Collector può adattarsi a qualsiasi situazione e prodotto, ma è particolarmente adatto per industrie alimentari, forniture per ufficio, immagazzinamento di multimedia e industrie farmaceutiche e/o cosmetiche.

In campo alimentare c'è sempre più richiesta di sistema tampone tra produzione e confezionamento. L'I-Collector offre un modo veloce e affidabile per la conservazione dei prodotti prima dell'imballo finale, e se necessario può svolgere azioni di sorting. Risulta quindi essere un sistema di raccolta veloce e automatizzato: le merci sono raccolte, conservate e portate nella zona di spedizione, evade completamente gli ordini in una sola operazione e ha la capacità di smistare i prodotti sia in ingresso che in uscita.

Per quanta riguarda la logistica delle forniture per ufficio essa è caratterizzata dalla forte esigenza di reattività in preparazione per garantire consegne entro le 24 ore. Così l'attenzione è sulla produttività, reazione in risposta a brevi ritardi e volumi giornalieri importanti.
Il mondo dei libri e dell'editoria si caratterizza per la gestione di due fasi della rete nella vita dei prodotti: il lancio che è la preparazione in grande quantità, e il reintegro che è la fornitura in piccole quantità.
Il commissionamento completamente automatizzato è una soluzione molto vantaggiosa per la prima fase e il reintegro in grandi quantità. L'I-Collector può essere progettato anche per portare merci all'operatore. Questa può essere una soluzione vantaggiosa per un reintegro in piccole quantità e per un assortimento generale.

La distribuzione dei prodotti farmaceutici richiede rigore lungo tutta la catena logistica, per garantire la qualità globale delle attività. Per quanto riguarda i prodotti, i farmaci non solo hanno una durata limitata, ma anche bisogno di una temperatura controllata durante l'immagazzinamento e

la spedizione. Per questo motivo, i laboratori nonché i distributori hanno bisogno di un sistema affidabile al 100% e la tracciabilità globale del flusso logistico e degli eventi associati.
La logistica dei prodotti cosmetici è così particolare che necessita di soluzioni specifiche, ad esempio vi è un'offerta estremamente vasta basti pensare all'elevato numero di profumi, prodotti per la cura dei capelli e trattamenti di bellezza. Tutti questi articoli sono molto simili in dimensioni e pesi e rappresentano un problema importante per gli ordini in fase di preparazione e di raccolta dove un elevato tasso di errore può riscontrato, ed è qui che entrano in gioco le potenzialità dell'I-Collector.

### 1.2.4 Sistemi automatizzati con scaffalature di picking mobili

L'ultima tipologia di sistemi super intensivi analizzati è soluzione dedicata soprattutto all' E-Commerce. E' un magazzino caratterizzato da sistemi automatizzati con scaffalature mobili ed tecnologia di automazione per centri di distribuzione che aiuta le aziende a semplificare le operazioni e ridurre i costi aumentando la flessibilità strategica utilizzando robot autonomi e un software di controllo sofisticato. I prodotti invece di essere stoccati in statiche scaffalature vengono immagazzinati in scaffali mobili, movimentati da una flotta di veicoli automatici che recuperano gli scaffali necessari e li portano agli addetti posizionati nelle stazioni di picking lungo il perimetro, che prelevano l'elemento richiesto e lo mettono nel contenitore ordine. Grazie al software che gestisce la dimensione dell'imballaggio e il numero/posizione degli articoli da prelevare, il sistema permette di comporre facilmente un ordine corrispondente all'acquisto effettuato on line da un utente. Il sistema di evasione degli ordini permette tempi ciclo molto rapidi e con meno manodopera al ricevimento, alla raccolta, alla spedizione. Ideato per rispondere alle esigenze degli acquisti on line, come la rapidità di consegna, la facilità dei resi e la multicanalità, questa nuova soluzione consente una modalità di prelievo veloce ed elevata scalabilità, grazie all'aumento di nuovi scaffali mobili, regolabili in base alle dimensioni dei prodotti. Un ulteriore importante caratteristica di questi sistemi è il fatto che sia implementabile anche in magazzini dove la mobilità è un fattore importante o dove è prevista un'ampia gamma di prodotti di diversi formati. Inoltre, sfruttando velocità di traslazione dei robot, i sistemi d'inventario dati e una rinnovata strategia di utilizzazione dello spazio di magazzino, queste soluzioni sono in grado di migliorare le condizioni degli operatori che lavorano nel settore e-commerce, risparmiando tempo ed energia e migliorando l'ambiente di lavoro anche nei periodi di picchi degli ordini.

Le caratteristiche più importanti di questi sistemi sono:

- Rapida installazione: l'installazione può richiedere un minimo di un paio di settimane.

- Espansione modulare: in caso di improvvisa crescita del mercato o di elevati flussi momentanei è sufficiente aumentare il numero di robot e/o di scaffalature.
- Prelievo e stoccaggio simultaneo: il prelievo e lo stoccaggio dei prodotti possono procedere allo stesso tempo.
- Flessibilità rispetto al prodotto: scaffali di stoccaggio e postazioni di lavoro possono essere configurati per gestire piccoli oggetti, oggetti di grandi dimensioni, scatole e cartoni, casse pieni , merci fragili , imballaggi di forma strana , e molti prodotti che non possono essere gestiti da un tradizionale AS / RS .

Tra i vari operatori che agiscono sul mercato dei sistemi di stoccaggio si segnala Kiva System azienda produttrice di robot specializzati nel trasporto merci dal 2012 e ultimamente acquistata dall' impresa di commercio elettronico Amazon, leader del commercio online. La soluzione proposta da Kiva è la prima di questo genere ad apparire sul mercato e a differenza delle aziende concorrenti offre al cliente diversi tipi di robot in grado in movimentare sia contenitori che cartoni e pallet (figura 3.20).

Tali magazzini però hanno una densità di stoccaggio molto bassa e in generale la saturazione superficiale per questo tipo di soluzione è molto bassa, nelle aree geografiche in cui non si hanno particolari vincoli di spazio e costruire od affittare centri di distribuzione risulta relativamente poco costoso, i clienti di solito scelgono di distribuire la soluzione Kiva su un unico livello. Tuttavia, la soluzione non è limitata ad operare al piano terra infatti Kiva system è in grado di operare anche su magazzini a più piani, alcuni clienti fanno uso dello spazio verticale utilizzando soppalchi e piattaforme. Il movimento dei robot è infatti integrato con ascensori verticali che permettono al veicolo di spostarsi da un livello all'altro.

***Figura 1.19.*** *Robot del sistema Kiva.*

# CAPITOLO II
# POLITICHE DI ALLOCAZIONE DELLA MERCE E OTTIMIZZAZIONE DEI MAGAZZINI

## 2.1 Politiche di allocazione della merce

Magazzini e centri di distribuzione svolgono un ruolo molto importante nella supply-chain, quindi ridurre al minimo il tempo di risposta è un obiettivo fondamentale. Infatti migliorare il tempo di risposta, significa ottimizzare la reattività e la capacità di flusso del sistema. In un magazzino, ci sono quattro decisioni progettuali principali che influenzano il tempo di risposta di un sistema di stoccaggio di unità di carico (Roodbergen e Vis, 2009):

- dimensioni del sistema di stoccaggio;
- criterio di allocazione della merce;
- la politica di recupero;
- posizione del punto di Input/Output (I /O) punto.

Prima di essere prelevati, gli articoli devono essere allocati in una postazione di stoccaggio in modo ottimizzare il più possibile il tempo di risposta (Brynzèr and Johansson, 1995). L'allocazione può essere fatta con vari metodi e regole, a seconda di quale strategia di prelievo si voglia implementare nel magazzino. I prodotti uniti in UdC, tipicamente pallet oppure colli, vengono conservati in sistemi che possono essere molto diversi, da semplici scaffalature a complessi sistemi automatizzati con gru o nastri trasportatori (Rouwenhorst et al., 2000 ; De Koster et al., 2006). Seguendo la categorizzazione data De Koster et al. (2006), si elencano le varie possibilità di stoccaggio ed allocazione degli articoli:

(i) Dynamic storage.
Le UdC vengono prelevate da un AS/RS e trasportate in un'area di picking molto piccola per minimizzare i tempi di viaggio. Questa politica può essere resa più efficiente introducendo il batching degli ordini e ben pianificando l'uso degli AS/RS. Tali sistemi permettono un'alta produttività del sistema e, infatti, le loro implementazioni sono in crescita (De Koster et al., 2006).

(ii) Random (o shared) storage.
Ogni UdC in ingresso è assegnata casualmente ad una delle postazioni vuote nel deposito (es. Petersen, 1997). Questo metodo ottiene un buon utilizzo dello spazio

verticale, ma le distanze da percorrere aumentano ed è necessaria una gestione informatica del sistema (De Koster et al. , 2006 ; Pan and Shih, 2008).

(iii) Closest open location storage.

Se in fase di deposito la scelta di dove allocare l‟UdC, allora probabilmente essa verrà posizionata nella postazione libera più vicina. Questo sistema ha prestazioni simili al caso random storage (De Koster et al., 2006).

(iv) Dedicated storage.

È possibile scegliere di allocare ogni UdC in una posizione fissa stabilita a priori. Questo metodo ha il pregio che i picker riescono a memorizzare le posizioni dei prodotti ed è adatto nel caso di merci con pesi molto diversi (le più pesanti a i livelli più bassi, quelle leggere più in alto), ma lo spazio richiesto è molto superiore alle altre opzioni, visto che corrisponde alla somma delle massime quantità possibili a stock di ogni articolo, ed è maggiormente implementato nell'ambito dei magazzini manuali (Van den Berg and Gademann, 1999; De Koster et al., 2006).

(v) Full-turnover (o volume based) storage.

I prodotti sono organizzati secondo la rotazione che li caratterizza, con quelli più venduti posti nelle zone più accessibili, che di solito sono vicine al punto di I/O. La domanda di un articolo è variabile nel tempo, dunque si dovrebbero riordinare spesso le UdC per garantire lo stoccaggio ottimale, ma tale attività ha lo svantaggio di essere costosa ed impegnativa (Petersen and Schmenner, 1999; De Koster et al., 2006). In generale, la gestione delle informazioni è molto più critica ed importante per politiche di allocazione basate sulla richiesta del prodotto (Caron et al., 1998).

(vi) Class based storage.

Viene chiamato anche zone storage in Hsieh and Huang (2011). L'idea di base consiste nel dividere gli articoli in alcune classi, sempre in numero maggiore a due e indicate con le lettere A, B, C..., motivo per cui in Rouwenhorst et al., 2000. si parla di ABC zoning, assegnando ad ogni classe di articoli una zona del magazzino ed usando una politica di random storage all'interno delle singole aree. La suddivisione in classi è basata sul diagramma di Pareto.

Con questa strategia, è necessario più spazio rispetto ad uno stoccaggio random, ma meno rispetto ad uno dedicated (Van den Berg, 1999; Van den Berg and Zijm, 1999; De Koster et al.,2006). Le classi vengono stabilite di solito in base alla domanda di ogni prodotto e spesso ci si limita a 3 classi di articoli. In generale, il class-based storage è una politica piuttosto efficiente e può raggiungere gli stessi livelli di performance

dell'archiviazione basata sul full-turnover. Le decisioni strategiche che devono essere prese sono il numero di classi e la dimensione della zona di magazzino da dedicare alla classe. Solitamente è utilizzata una suddivisione in tre classi che permette sia una facile implementazione che una riduzione del tempo di attraversamento (fino a raggiungere un valore vicino a quello ottimale, vedere Yu e De Koster, 2012).

Le decisioni strategiche da prendere in un magazzino sono strettamente legate al criterio di allocazione della merce utilizzato e alla forma dello stabile. Ad esempio, per un sistema a forma di parallelepipedo rettangolare e sotto il criterio di archiviazione casuale, le variabili di decisione sono solamente le dimensioni del sistema di stoccaggio, mentre se è stato scelto il criterio class-based, con C numero delle classi e C maggiore di due, oltre alle dimensioni del magazzino, è necessario ottimizzare i confini delle zone dedicate alle classi (almeno C-1 variabili decisionali).
Hausman et al. (1976) è stato il primo che ha iniziato a studiare le politiche di stoccaggio in un magazzino bidimensionale (2D) e dei sistemi di recupero AS/RS, ricavando formule per il calcolo del tempo di viaggio per i due criteri di archiviazione random e class-based, oltre ad ottenere i confini delle zone ottimali per le politiche di archiviazione a due classi e tre classi.
Da allora, molti ricercatori hanno studiato l'ottimizzazione dei sistemi di storage 2D sotto differenti condizioni di conservazione (ad esempio Rosenblatt e Eynan, 1989; Eynan e Rosenblatt, 1994; Kouvelis e Papanicolaou, 1995; Van den Berg, 1996; Thonemann e Brandeau, 1998; Ashayeri et al, 2002;. Park, 2006). Roodbergen e Vis (2009) hanno revisionato diversi metodi che sono stati utilizzati per ottenere i confini delle zone ottimali in un criterio di archiviazione class-based, mentre Yu e De Koster (2012) mostrano che un basso numero di classi è (quasi) ottimale.
Tali articoli, però, riguardano solo l'ottimizzazione dei confini di classe di archiviazione e confrontare la percentuale di miglioramento rispetto ad una politica ottimale di archiviazione casuale utilizzato come confronto. In un sistema 2D AS/RS tradizionale, la macchina S/R è in grado di muoversi in direzioni *x* e *y* simultaneamente (Chebyshev distanza metrica). Dal momento che i movimenti nelle direzioni *x* e y sono simmetriche, è banale che le dimensioni ottimali del sistema risulteranno SIT (square-in-time).

Ultimamente stanno prendendo piede i magazzini 3D, o super intensivi. Questi sistemi stanno diventando sempre più popolari grazie alla completa automazione, alla alta densità di stoccaggio e ai tempi di risposta brevi. In tali sistemi, diversi componenti del sistema possono muoversi nello spazio tridimensionale. Diversi tipi di magazzino compatto 3D, con diversi sistemi di movimentazione interna sono già stati implementati, e altri tipi ancora, con nuovi sistemi di movimento, saranno a breve introdotti. De Koster et al. (2008) hanno portato a termine lo studio di

un sistema di deposito compatto 3D dove un trasportatore è preposto al movimento di profondità. Essi ottimizzano tutte le dimensioni di tale sistema di stoccaggio, applicando una allocazione delle merce random-based e minimizzando i tempi di risposta. Yu e De Koster (2009b) hanno proposto un magazzino simile 3D con un criterio di archiviazione basato su due classi. Lo scopo è quello di ottimizzare la configurazione magazzino, delimitando il primo confine per la classe A e arrivando così al tempo di risposta minimo. Utilizzando un criterio di allocazione basato su due classi, la derivazione della formula tempo necessario ai viaggi diventa più complessa rispetto a quella ricavata per lo stoccaggio casuale. Questo perché considerando la curva ABC, aggiungendo il confine della prima classe, oltre alle dimensioni del sistema, si ha un maggior numero di variabili e vincoli che comporta una funzione obiettivo più complessa. Tuttavia, l'ottimizzazione del modello mostra che le dimensioni ottimali (o, più precisamente i rapporti lunghezza / larghezza / altezza) del magazzino sono identici a quelli di stoccaggio casuale. Zaerpour (2013) ha proposto lo studio di un sistema compatto Live-Cube in cui navette sono responsabili dei movimenti nelle direzioni x e *y* in ogni livello e un ascensore sposta le unità di carico tra i diversi livelli di direzione *z*. Il primo passo è quello di ottimizzare le dimensioni del sistema sotto un criterio di archiviazione random utilizzando un processo di decomposizione che porta a quattro diversi casi complementari. Il secondo è stato quello estendere il loro lavoro considerando un criterio di archiviazione basata su due classi. Aggiungendo al problema un confine per le classi come variabile decisione, la procedura di derivazione del tempo di viaggio diviene molto più complessa esplodendo 36 casi per la memorizzazione basata su due classi rispetto a quattro casi per la memorizzazione casuale. Questo porta ad un modello matematico con maggior numero di variabili e vincoli. Tuttavia, i risultati mostrano che le dimensioni ottimali dei due sistemi sono identiche.

## 2.2 Formulazione generale del modello matematico

Si consideri un magazzino e si proceda con quattro assunzioni di base:

- La capacità di stoccaggio del sistema è data. E' comunque utile notare che un magazzino con una data capacità è grado di ospitare un numero minore di unità di carico per prodotto in caso di utilizzo di politiche di allocazione come full-turnover o class-based rispetto ad un impianto con la stessa capacità massima ma funzionante con uno stoccaggio randomizzato. Nel caso di allocazione random-based tutti i vani vuoti possono essere raggruppati per ospitare un numero di posti di stoccaggio e recupero stocastico.
- Tutte le locazioni di deposito sono uguali in termini di dimensioni e di ogni sede ospita un solo tipo di prodotto.

- All'interno di ciascuna classe di stoccaggio le unità di carico vengono memorizzati in modo casuale (ad esempio, le unità di carico all'interno di una classe sono trattate allo stesso modo, anche se potrebbero avere una diversa frequenza di rotazione).
- Si assumono cicli di tipo semplice (si intende che ogni richiesta di deposito o di recupero sia come un ciclo; questa ipotesi è necessaria per derivare le formule in forma chiusa dei tempi di percorrenza).

Le ipotesi non sono eccessivamente restrittive e trovano numerosi riscontri in letteratura (ad esempio, Hausman et al, 1976, Bozer and White, 1984; Rosenblatt e Eynan, 1989; Eynan e Rosenblatt, 1994; Kouvelis e Papanicolaou, 1995; De Koster et al, 2008; Yu e De Koster, 2009b;. Zaerpour et al, 2011, 2012b).

Si definiscono i vari parametri:

N = numero di posizioni di memoria nel sistema di memorizzazione;

$t_i$ = il tempo di viaggio di sola andata per spostare una unità di carico dalla posizione *i* al punto di I/O o viceversa; *i*=1,…,N; le locazioni sono indicate con numeri crescenti in modo tale che $t_i \leq t_{i+1}\ \forall i <$ N;

$\lambda_j$ = rotazione dell'unità di carico *j*; indica il numero di volte che il prodotto *j* viene depositato o recuperato nell'unità di tempo; $\lambda_j$ sono in ordine decrescente in modo tale che $\lambda_j \geq \lambda_{j+1}\ \forall j\ <$ N;

Per quanto riguarda l'allocazione random, il tempo previsto per il viaggio di sola andata è:

$$E[T_R] = \bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^{N} t_i}{N} \qquad (2.1)$$

Si analizzi ora il tempo necessario in casi di implementazione della politica basata sul full-turnover: la merce con frequenza di rotazione più elevata è assegnata alla posizione più vicina al punto di I/O, e le atre unità di carico sono assegnate analogamente (cioè, carico unitario 1 con rotazione $\lambda_1$, assegnato alla posizione 1 con il tempo di viaggio $t_1$, carico unitario 2 con rotazione $\lambda_2$, assegnato alla posizione 2 con il tempo di viaggio $t_2$, etc). Pertanto, il tempo necessario atteso per la sola andata con criterio di allocazione della merce full-turnover based è (Hausman et al., 1976):

$$E[T_F] = \frac{\sum_{i=1}^{N} t_i * \lambda_i}{\lambda} \qquad (2.2)$$

dove $\lambda = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i$

In un criterio di archiviazione class-based, magazzino e prodotti sono suddivisi in C zone e in C classi di prodotto, e la classe la rotazione più elevata è assegnata alla zona più vicina al punto di I/O, e le altre a seguire. I prodotti all'interno di ciascuna classe sono non sono suddivisi in termini di tassi di rotazione e quindi le unità di carico di qualsiasi prodotto possono essere assegnati in modo casuale a qualsiasi posizione di memorizzazione all'interno della zona dedicata. Il tempo di percorrenza previsto per una unità di carico, ipotizzando la suddivisione in due classi è:

$$E[T_C] = \frac{\sum_{i \in R1} \lambda 1 * \overline{t_I} + \sum_{i \in R2} \lambda 2 * \overline{t_{II}}}{\lambda} \qquad (2.3)$$

dove:

- $R_1$ *e* $R_2$ sono l'insieme delle locazioni appartenenti rispettivamente alla prima e alla seconda zona;
- $\lambda_i$ rappresenta la rotazione delle unità di carico nella locazione $i$ con $\lambda_i \geq \lambda_j$, $\forall i \in R_1$ $\forall j \in R_2$;
- $\overline{t_I}$ e $\overline{t_{II}}$ sono i tempi medi di traslazione dai vani, rispettivamente in $R_1$ *e* $R_2$, al punto di I/0, con $\overline{t_I} = \frac{\sum_{i \in R1} t_i}{|R_1|}$ e $\overline{t_{II}} = \frac{\sum_{i \in R2} t_i}{|R_2|}$.

Si procede ora a confrontare la complessità di analisi (calcolo del tempo di viaggio e ottimizzazione della configurazione) per differenti condizioni di stoccaggio mediante un semplice esempio illustrativo. In figura 2.1 è schematizzato un magazzino suddiviso in due classi di deposito con una forma prismatica a base rettangolare sia per il magazzino stesso che per la prima zona ($R_1$). $b_i$ e $x_i$ ($i$ = 1,2,3) rappresentano le dimensioni (in unità di tempo) della prima zona e del sistema.
Il sistema di circolazione interna definisce il modello temporale e questo imprime la forma della prima zona.

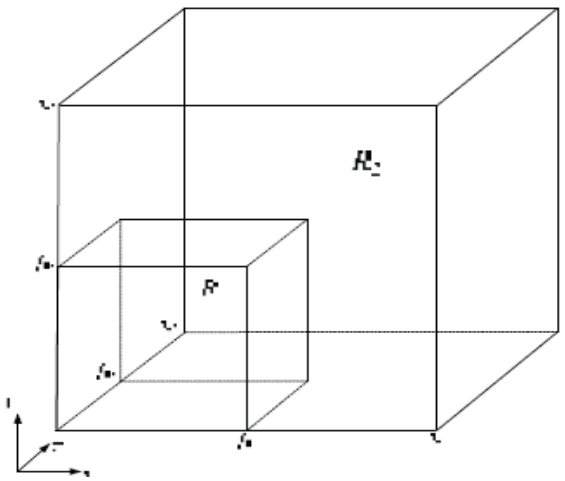

***Figura 2.1.*** *Schematizzazione di un magazzino diviso in due classi.*

Nell' esempio illustrativo, il tempo per raggiungere un carico alla posizione (X, Y, Z) è dato da max{max $\{t_X, t_Y\}$,$t_Z$}. Questo valore corrisponde al tempo massimo necessario ad una macchina S/R per muoversi in X e Y, direzioni in cui si sposta contemporaneamente, e ad un sistema indipendente di movimentazione in profondità che si sposta direzione Z, ipotizzando che i due movimenti inizino simultaneamente (Yu e De Koster, 2009b ). Questa espressione imprime una forma prismatica a base rettangolare, per la prima zona, dato che $t_X$ e $t_Y$ rappresentano il tempo di percorrenza della macchina S/R dal punto di I/O alla posizione (X, Y, 0) (cioè in posizione frontale rispetto allo scaffale) nelle direzioni *x e y*, mentre e $t_Z$ rappresenta il tempo di percorrenza necessario a raggiungere la profondità Z cercata. Apparentemente, diversi modelli temporali potrebbero imprimere alla prima zona delle forme diverse.

In letteratura, le posizioni di stoccaggio e il turnover sono spesso rappresentati mediante moduli continui. Queste semplificazioni riducono notevolmente la difficoltà di analisi mentre i risultati sono sufficientemente vicini ai sistemi discreti (Hausman et al, 1976;. Graves et al, 1977;. Rosenblatt e Eynan, 1989; Eynan e Rosenblatt, 1994; Kouvelis e Papanicolaou, 1995). Nel caso in cui la rotazione della merce sia rappresentata dalla curva ABC (nota), uno dei modelli proposti è:

$$A(i) = i^s \qquad (2.4)$$

dove *s* è il parametro di asimmetria e dove la gestione degli approvvigionamenti viene eseguita con il lotto economico di acquisto (EOQ). Di conseguenza il tempo di percorrenza previsto per una unità di carico qualsiasi, con allocazione della merce impostata su due classi, può essere espressa da (Hausman et al ., 1976; Rosenblatt e Eynan, 1989; Eynan e Rosenblatt, 1994):

$$E[T_C] = G^{2s/(1+s)} * E[T_1] + \left(1 - G^{2s/(1+s)}\right) * E[T_C] \qquad (2.5)$$

dove G è il volume della prima zona diviso per il volume del sistema ($V_1$/V) e $E[T_1]$ e $E[T_2]$ sono i tempi di percorrenza attesi della prima e della seconde zona. Per riuscire ad ottenere $E[T_C], E[T_1]$ e $E[T_2]$ devono essere calcolati separatamente. Inoltre, sei variabili devono essere considerate nel processo di calcolo di $E[T_C]$ ($b_i$ e $x_i$, $i$ = 1,2,3). Diversamente, l'ottenimento del tempo di traslazione previsto in un magazzino identico.ma con sistema di stoccaggio casuale ($E[T_R]$) è più semplice in quanto prevede tre variabili che sono le dimensioni del sistema ($x_i$, $i$ = 1,2,3). Per un sistema a due classi con forma della prima zona diversa da un parallelepipedo, la complessità del processo di calcolo aumenta sensibilmente.

Il processo di ottimizzazione di un sistema di stoccaggio con politica di deposito casuale è ancor meno complesso di quello per uno stoccaggio class-based. Continuando lo studio del problema in esame, il modello matematico punta ad ottimizzare la configurazione di un magazzino suddiviso in

due zone dedicate alle rispettive classi. I limiti delle zone che ottimizzano i tempi di percorrenza, possono essere formulati come segue (la capacità del sistema è normalizzata a uno),

$\min E[T_C]$ (2.6)

Vincoli:

$b_i \leq x_i$ per $i$=1,2,3 (2.7)

$b_1 b_2 b_3 = G$ (2.8)

$x_1 x_2 x_3 = 1$ (2.9)

Variabili decisionali:

$b_1, b_2, b_3$ e $x_1, x_2, x_3$

Il vincolo (2.7) stabilisce che i confini della prima zona ($b_i$) sono più vicini al punto di I/O rispetto alle dimensioni massime del sistema ($x_i$). I vincoli (2.8) e (2.9) stabiliscono che il volume della prima zona rappresenta il (100*G)% del volume totale del sistema, e il volume della seconda zona conti per 100*(1 - G)% del volume totale del sistema.
Tuttavia, per un sistema di stoccaggio simile sotto un criterio di archiviazione casuale, il modello matematico che ottimizza la configurazione del sistema che porta ad un tempo di percorrenza minimo previsto, può essere formulato come segue,

$\min E[T_C]$ (2.10)

Vincoli:

$x_1 x_2 x_3 = 1$ (2.11)

Variabili decisionali:

$x_1, x_2, x_3$.

Per questo esempio, può facilmente capitare che le configurazioni ottimali per entrambi i modelli matematici siano identiche per entrambi i modelli, nonostante il primo modello abbia un numero di variabili decisionali e vincoli maggiori.

In oltre Zaepur (2013), ha dimostrato che la forma ottimale di un magazzino con una data capacità è indipendente dalla politica di allocazione della merce. Il risultato è che ottimizzando il tempo di risposta (per i cicli semplici) di un sistema di stoccaggio con qualsiasi sistema di movimentazione interna e con il punto di I/0 in qualsiasi posizione, con qualsiasi sistema di allocazione della merce (random-based, full-turnover based, class-based) si ottiene la stessa configurazione del magazzino. Questo risultato influenza fortemente l'attuale procedimento di progettazione del magazzino, in

quanto, per ridurre al minimo il tempo di risposta del sistema, si può partire dall'ottimo ottenuto con l'allocazione random. Questo porta ad un modello di ottimizzazione molto più semplice. Inoltre, in fase di progettazione sono richieste molte meno informazioni. Una volta realizzato il magazzino, si può passare dal deposito casuale a politiche di allocazione full-turnover, oppure class-based, senza perdere di efficienza.

# CAPITOLO III
# SISTEMA AUTOSTORE

## 3.1 Introduzione

AutoStore è un nuovo tipo di sistema di stoccaggio. Lo scopo principale del magazzino è di migliorare la qualità della logistica interna. AutoStore, il sistema che verrà analizzato in questa tesi, è un magazzino automatico 3D azionato da robot ed è un prodotto chiave per la logistica delle varie aziende, soprattutto nel campo dell'e-commerce. Esso ha avuto successo in Europa, dove è già stato implementato da Antalis, ASDA (che fa parte del gruppo Wal-Mart), Competec Group, Swiss Post, Stormberg e Komplett, grazie alla sua capacità di ridurre la necessità di manodopera, massimizzare l'utilizzo dello stoccaggio e funzionare 24 ore al giorno, oltre ad essere un sistema a basso consumo di energia. Per quanto riguarda l'implementazione e la distribuzione del magazzino, Autostore ha un contratto mondiale con Swisslog, che sta cercando di esportare il prodotto anche in nuovi mercati come la Cina e l'India.

Grazie al magazzino AutoStore si può evitare di dover aver file e file di scaffali difficilmente accessibili, carrelli elevatori e innumerevoli pallet, e si può recuperare lo spazio sprecato che viene utilizzato solo per consentire l'accesso alle merci, quello delle corsie.

Il punto di forza di AutoStore è nella sua semplicità. Una griglia in alluminio offre lo spazio di archiviazione per la merce da stoccare. Le dimensioni e la forma della griglia dipendono solo dalla struttura del magazzino in cui verrà montata in modo tale da garantire l'utilizzo ottimale di tutta la superficie disponibile. La merce verrà stoccata in contenitori standard (600 x 400 x 330/430 mm) in di plastica all'interno della griglia stessa.

I robot sono il punto di forza del sistema AutoStore. Si muovono senza sosta su delle rotaie poste in cima alla griglia. Essi sollevano i contenitori dai loro vani, li spostano, li rimescolano, li portano al punto di I/O per l'elaborazione, per poi riportarli nuovamente in rete.

Quando sono richiesti i prodotti depositati ai livelli più bassi i robot lavoreranno insieme per scavarsi la strada verso il contenitore richiesto. Per velocizzare le richieste future i robot ottimizzano continuamente la posizione di stoccaggio dei contenitori all'interno della griglia, ponendo i prodotti richiesti più spesso ai livelli più alti.

I punti di I/O sono l'interfaccia tra il deposito e il personale addetto al magazzino. Qui i Bins lasciano la griglia per le operazioni di picking e sorting. Tali "porte" possono essere installate su qualsiasi lato della griglia, o, in un impianto multi-piano, anche al di sotto della griglia. I robot alimentano continuamente i punti di I/O con nuovi contenitori, assicurando agli operatori un tempo di attesa minimo o nullo tra due ordini consecutivi.

### 3.1.1 Il sistema

Autostore si basa su contenitori, impilati uno sopra l'altro all'interno di una griglia di alluminio. Il secondo componente sono i robot che prelevano, organizzano e depositano le unità di carico con una logica di sistema prescelta. Con algoritmi avanzati i robot comunicano attraverso frequenze radio per le regolarizzare le operazioni. Uno dei fattori chiave per ridurre il tempo di prelievo per unità di carico in questo sistema è che i robot rimovimentano i contenitori in modo tale che le merci ad elevata movimentazione (i contenitori maggiormente utilizzati) siano collocate ai livelli più elevati della griglia, mentre i prodotti movimentati con minor frequenza vengano depositate ai livelli inferiori.

### 3.1.2 La griglia

La griglia è una struttura in alluminio organizzata in celle rettangolari. Ogni cella ha spazio per diversi contenitori che sono depositati uno sopra l'altro. Differenti configurazioni di altezza e forma sono implementabili, rendendo così la struttura AutoStore in grado di circondare pilastri e altri ostacoli già presenti nel magazzino. Quindi le dimensioni e la forma della griglia sono limitati solo dallo spazio del magazzino circostante in modo tale da garantire l'utilizzo ottimale dello spazio. Al di sopra della griglia sono posizionate le piste di scorrimento per i robot.
Costruire la struttura della griglia AutoStore è solo un po' più difficile che mettere insieme una manciata di mattoni LEGO ™. Tutti i componenti di AutoStore sono moduli standardizzati semplici da montare e facile da collegare. Sulla parte superiore della griglia sono presenti dei binari che scorrono nelle direzioni X e Y, permettendo ai robot di accedere a qualsiasi cella all'interno della griglia.
Oltre alla griglia principale ogni installazione richiede un'area di servizio dedicata ai robot per la manutenzione e riparazione. Per motivi di sicurezza l'accesso a questa area deve essere riservata.

### 3.1.3 I contenitori

In AutoStore c'è un posto per ogni cosa e ogni cosa ha il suo posto. Tutte le merci sono immagazzinate in unità di carico standardizzate: contenitori di plastica appositamente progettati chiamati Bins. Ogni singolo Bin è identificato da un numero unico che viene memorizzato nel database del sistema di controllo e ripetuto su un'etichetta applicata al Bin stesso.

Questo è il modulo di base in cui le merci sono immagazzinate. I contenitori sono attualmente disponibili in due diverse altezze e possono essere realizzati in materiali diversi per ottenere particolari proprietà, per esempio contenitori antistatici PP-ESD per l'industria elettronica oppure in HDPE. Le misure interne sono standard: 600 millimetri x 400 millimetri, con altezza di 210 millimetri o 310 millimetri, mentre esternamente misurano 220 o 330 millimetri.

Tutte le merci arrivano al punto di I/O all'interno di un Bin. I contenitori possono anche essere divisi in più scomparti per ospitare diverse categorie di prodotti, complicando gli algoritmi di controllo. I contenitori non devono mai essere rimossi dalla griglia e ritornano allo stoccaggio una volta che un elemento è stato elaborato.

### 3.1.4 I punti di I/O

Questo modulo fornisce i contenitori all'operatore. I punti di I/O possono essere installati su tutti i lati della griglia, o anche al di sotto se la griglia è al piano sopra. Quando un robot trasporta un contenitore a un porto, questo preleva il bin elaborato in precedenza e ritorna all'interno del sistema di stoccaggio. Così, i nuovi contenitori sono consegnati back-to-back e l'operatore ha raramente tempi vuoti aspettando i bidoni. In ogni punto di I/O è presente uno schermo che mostra le informazioni di stato, fornisce funzioni di supporto semplici e registra le varie operazioni.
I punti di I/O di AutoStore sono i come dei cancelli che nascondono tutte le attività di magazzino dagli occhi del personale. Tutti gli ordini vengono consegnati al posto giusto proprio in tempo. Tutto ciò che deve fare l'operatore è scegliere il prodotto e prepararlo per la successiva elaborazione.
Le porte possono essere posizionati sui lati esterni della griglia e sono disponibili in due diverse versioni: Carousel e Conveyor.

### 3.1.5 I robot

Questo è il modulo che più caratterizza il sistema AutoStore. Questi sono i lavoratori che muovono i contenitori. Un robot ha due serie di ruote che permettono di spostarsi lungo due assi. Questo rende possibile a tutti i robot di raggiungere qualsiasi posizione sulla griglia. Il robot è dotato di un ascensore per il prelievo, il trasporto, e il deposito dei contenitori che sono stoccati nella griglia. Il robot comunica con il sistema di controllo tramite un collegamento wireless e viene ricaricato automaticamente quando necessario (la carica avviene normalmente durante la notte).
Anche se i robot di AutoStore possono essere considerati specializzati nei loro compiti, sono anche molto flessibili. Non solo raccolgono e movimentano continuamente la merce, ma sono altrettanto efficaci nell'aiutare il riempimento della rete fornendo Bins vuoti ai punti di I/O e la memorizzazione di nuovi prodotti nella griglia. In qualsiasi operazione in cui si stiano applicando i robot mantengono una elevata efficienza e una velocità ottimale. Inoltre i robots sono forte e agili: oltre ai 5 kg di peso del contenitore riescono a movimentare fino a 30 kg di merce. E pur essendo una vera centrale elettrica ogni robot utilizza solo 0,1 kWh, facendo di AutoStore uno dei sistema di magazzino "più verde" in circolazione.

### 3.1.6 Il sistema di controllo

Il sistema di controllo AutoStore è il centro di comando del magazzino. Esso fornisce la connessione di rete a tutta l'infrastruttura. Esso comprende un commutatore di rete e il controllore PC che fornisce l'interfaccia di rete per il network del cliente.
Il sistema di controllo di AutoStore adempie alle seguenti funzioni:

- Pianificazione e programmazione delle attività.
- Controllo della posizione dei contenitori e dei robot in tempo reale.
- Connessione di rete interfacciata all'installazione per utente finale.
- Fornire funzionalità al servizio di supporto.
- Sistema di allarme flessibile e configurabile (SMS - E-mail).
- Controllo di accesso avanzato per il personale di servizio.

### 3.1.7 L’access point

L'AutoStore Access Point (ASAP) collega il sistema in modalità wireless ai robot. Ogni installazione AutoStore ha almeno un ASAP che comunica con fino a 30 Robots in un intervallo di 50 metri. I Sistemi che più grandi o che hanno più di 30 Robots utilizzano più access point.

## 3.2 I benefici

Gli aspetti che rendono questo prodotto competitivo e in alcuni casi molto vantaggioso sono elencati qui sotto:

- Migliore utilizzo dello spazio di stoccaggio esistente (fino al 60% in più).
- Migliore utilizzo della manodopera.
- Risparmio energetico elevato.
- Sicurezza ed affidabilità.
- Flessibile e facile da espandere / installare.
- Elevata capacità di movimentazione oraraia.

Il posizionamento di tutti prodotti nelle griglie, lasciando spazio inutilizzato tra le scaffalature, contribuisce alla ottimizzazione dell'uso dello spazio di stoccaggio. Inoltre con questo nuovo modo di pensare, i robot raccolgono tutti i contenitori ad un ritmo elevato (vedi figura 1), lasciando meno oneri per i lavoratori. I robot sono azionati a batteria, ed eseguiranno tutte le operazioni possibili prima di tornare alla docking station per la ricarica, e operativi in qualsiasi momento e risparmiando così energia elettrica.

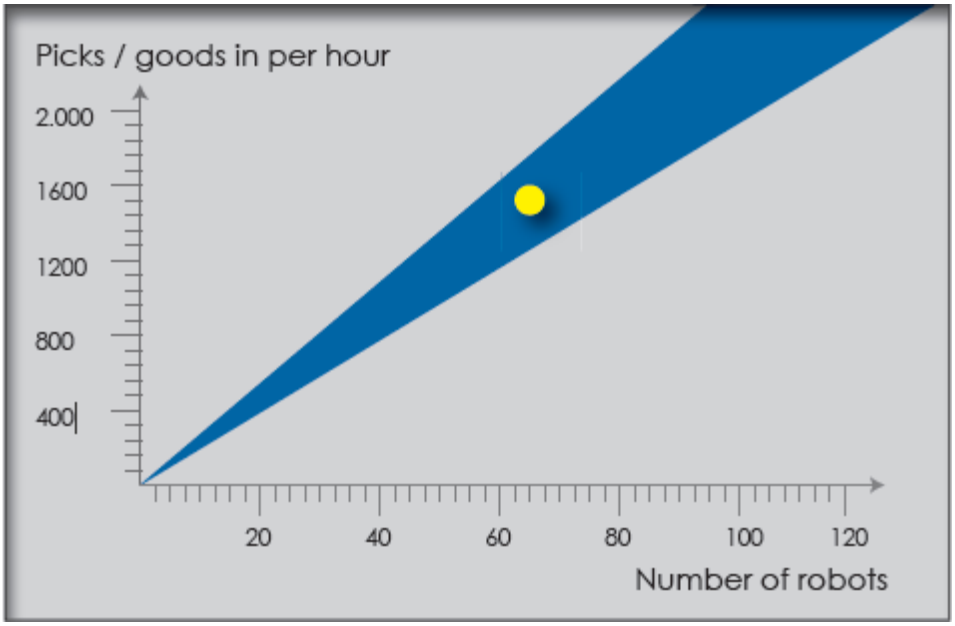


***Grafico 3.1.*** *Relazione tra i bin/ora movimentati e il numero di robot.*

## 3.3 Modello matematico

Il tempo impiegato da un robot per un ciclo di movimentazione può essere scomposto, al fine di una stima affidabile, nella parte necessaria a raggiungere la colonna di allocazione e la parte che considera tutte le operazione utili al recupero del contenitore richiesto.
I robot possono muoversi in una solo direzione contemporaneamente, o solo nella direzione x o solo nella direzione y. Una volta raggiunta la locazione indicata dal sistema di controllo il robot si ferma e inizia l'operazione di recupero del contenitore. Questa può risultare piuttosto complessa infatti spesso si rende necessario spostare e risistemare i contenitori sovrastanti a quello richiesto. Le unità di carico spostate andranno momentaneamente riposizionate sopra le griglie in cui scorrono i robot, l'ipotesi è che queste posizioni siano sempre libere. Tale restrizione non è poi così pesante in quanto i robot liberi risistemeranno i contenitori fuori posto mentre viene consegnata al punto di I/O la merce. Questa flessibilità e adattabilità è data dal fatto che tutti i robot utilizzano un sistema LAN wireless per comunicare con gli altri e con il sistema di controllo, e ciò permette anche agli operatori automatici più vicini di intervenire in supporto di un robot guasto o scarico.

Il sistema studiato si basa su quello studiato da Le-Duc et al. (2005) unitamente alla teoria dei magazzini manuali che come i robot AutoStore hanno i movimenti trasversali nelle due direzioni nono contemporanei. Vengono seguite le assunzioni di Le-Duc et al. (2005) (vedi anche Hausman et al. 1976, Bozer and White 1984, 1990, 1996 Ashayeri et al. 2002, Foley et al. 2004):

- lo scaffale in 3D è considerato avere una base rettangolare continua, in cui il punto I/O e allocato nel centro del fronte.

- I robot riescono a muoversi in una sola direzione *x* o *y* a velocità costante. Il tempo richiesto per raggiungere qualsiasi punto della griglia superficiale può essere rappresentato nella metrica di Chebyshev, oppure prendendo spunto dal dimensionamento dei magazzini manuali si ottimizza la percorrenza.
- Una volta raggiunta la locazione i robot iniziano la procedura di recupero della unità di carico richiesta.
- In prima approssimazione i robot operano a ciclo semplice, ovvero possono effettuare un solo deposito o un singolo ritiro in un viaggio di andata e ritorno dal punto I/O.
- In prima approssimazione ogni contenitore tiene un solo tipo di oggetto, anche se si possono suddividere in comparti le UdC.
- Tutti i vani di deposito e i contenitori hanno la stessa dimensione. Quindi tutti i vani possono essere usati per depositare un contenitore. Gli oggetti sono riforniti in accordo al modello EOQ (Economic Order Quantity).
- Viene utilizzata prima strategia di deposito turnover-based. Poi si cercherà di ottimizzare la forma del magazzino con altre politiche di allocazione della merce.
- Per semplicità di calcolo, in prima approssimazione, si ipotizza che un solo robot lavori al recupero.

Per quanto riguarda il tempo di recupero di un contenitore esso si può scomporre in tre punti:

1. Tempo necessario alla traslazione del robot dal punto di I/O alla locazione individuata. A sua volta scomponibile nel tempo necessario a percorrere la distanza lungo x sommata al tempo che il robot impiega per percorrere il tragitto lungo y.
2. Tempo necessario al prelievo. In questo caso si devono considerare molte variabili. Il tempo necessario a raggiungere il primo contenitore stoccato, prelevarlo, e eventualmente posizionarlo in una locazione vicina e sulla sommità della griglia in caso non fosse quello richiesto. Il tempo per tornare alla locazione, recuperare il primo contenitore della colonna e portarlo al punto di I/O oppure posizionarlo in cima alla griglia e reiterare i movimenti fino a che non si aggancia il contenitore richiesto. Il sistema di controllo gestisce i robot liberi in modo da ri-sistemare i contenitori temporaneamente posizionati sopra la griglia in modo tale da liberare i binari.
3. Tempo necessario per la traslazione dalla locazione al punto di I/O, scomposto a sua volta nel tempo per percorrere i binari in direzione *x* e separatamente *y*, a cui va sommato il tempo necessario a consegnare il bin al livello del punto di I/O:

Si introducono ora alcune dimensioni caratteristiche dello scaffale, dei vani che contengo i contenitori, delle velocità dei robot.

- J: numero di linee di contenitori, direzione *x* della terna.
- C: numero di righe di contenitori, direzione y della terna.
- N: numero di livelli di contenitori, direzione z della terna.

Il numero di colonne di cui è composta l'area di stoccaggio è data da J*C, mentre la potenzialità ricettiva, ossia il numero totale dei Bin è dato da J*C*N.
Le dimensione del singolo vano sono:

- $l_c$: lunghezza, direzione x.
- $w_c$: larghezza, direzione y.
- $h_c$: altezza, direzione z.

Le dimensioni del volume di stoccaggio sono:

- L: lunghezza, direzione x, $L = J * l_c$;
- W: larghezza, direzione y, $W = C * w_c$;
- H: altezza, direzione z, $H = N * h_c$.

Le velocità del robot nelle varie direzioni sono rispettivamente:

- $v_x$, velocità lungo x;
- $v_y$, velocità lungo y;
- $v_z$, velocità lungo z.

Dato che la velocità di traslazione è uguale nelle due direzioni, mentre la velocità con cui viene sollevato/abbassato il contenitore è diversa, nei calcoli si indicherà semplicemente $v = v_x = v_y$, e $v_z$.

Lo scaffale può essere descritto mediante la metrica di Chebyshev:

- $t_L = L/v$, lunghezza in tempo dello scaffale;
- $t_W = W/v$, larghezza in tempo dello scaffale;
- $t_H = H/v_z$, altezza in tempo dello scaffale.

Nei prossimi paragrafi si ipotizza che i robot partano sempre dal punto di I/O e facciano solo cicli semplici. La seconda ipotesi è che il livello sopra ai binari (dove viene temporaneamente

posizionato un contenitore d'intralcio al recupero di una certa merce) sia sempre libero dato che i robot momentaneamente inattivi li risistemano.

### 3.3.1 Tempo di recupero/deposito

Si assume che la locazione richiesta al robot sia rappresentata da (*x*, *y*, *z*) e X, Y, Z si riferiscono alle direzioni di movimento: X si riferisce ai binari che scorrono lungo la lunghezza, Y la larghezza, Z l'altezza.

1. Il tempo necessario per raggiungere la locazione *x*, *y* a partire dal punto di I/O:

$$T_1 = t_x + t_y = {}^{L_x}/_{v} + {}^{L_y}/_{v} \qquad \text{(eqz. 3.1)}$$

Dove il primo addendo rappresenta il tempo necessario alla traslazione lungo x. il secondo lungo y.

2. Il tempo necessario al recupero del contenitore è:

$$T_2 = \frac{[\sum_{i=1}^{i=Nz}(i-1)]*2*l_c}{v} + \frac{[\sum_{i=1}^{i=Nz}(i-1)]*2*h_c]}{v_z} \qquad \text{(eqz. 3.2)}$$

Dove il primo addendo indica il tempo necessario al momentaneo rimescolamento dei contenitori che occludo il Bin richiesto. Il 2 a numeratore è presente per considerare sia l'andata che il ritorno del robot alla posizione momentanea, da notare che è rappresentato il tempo massimo infatti è come se tutti i contenitori da rimescolare siano disposti in fila lungo una unica direzione, aumentando così la strada percorsa.
Il secondo addendo rappresenta il tempo necessario a elevare/depositare i contenitori attraverso la colonna.
$N_z$ indica il livello a cui è stoccato il bin richiesto.

3. Il tempo necessario per tornare dalla locazione al punto di I/O e consegna del bin (il punto di I/O è considerato al livello più basso):

$$T_3 = t_x + t_y + t_h = {}^{L_x}/_{v} + {}^{L_y}/_{v} + {}^{H}/_{v_z} \qquad \text{(eqz. 3.3)}$$

Quindi il tempo totale necessario per il recupero è dato dalla somma delle equazioni 3.1, 3.2, 3.3:

$$T = t_x + t_y + \frac{[\sum_{i=1}^{i=Nz}(i-1)]*2*l_c}{v} + \frac{[\sum_{i=1}^{i=Nz}(i-1)]*2*h_c}{v_z} + t_x + t_y + t_h \qquad \text{(eqz. 3.4)}$$

Per quanto riguarda il tempo di deposito si calcola il vano libero più vicino, sia per una logica di allocazione delle merci random, sia per le altre, in quanto i contenitori vengono rimescolati dai robot liberi o nel turno di notte secondo le direttive del controllo.

### 3.3.2 Tempo di recupero medio

Per calcolare il tempo di recupero medio è necessario sapere, o impostare, la posizione del punto di I/O. La posizione dello stesso si valuta guardando il volume di stoccaggio dall'alto. La posizione della porta modifica, una volta note le dimensioni, il tempo di traslazione necessario al robot per raggiungere la locazione.

- Per il punto di I/O posizionato nel punto in basso a sinistra della griglia superficiale:

$$T_1 = \frac{J}{2} * \frac{l_c}{v} + \frac{C}{2} * \frac{w_c}{v} \qquad \text{(eqz. 3.5)}$$

- Per il punto di I/O posizionato al centro del fronte:

$$T_1 = \frac{J}{4} * \frac{l_c}{v} + \frac{C}{2} * \frac{w_c}{v} \qquad \text{(eqz. 3.6)}$$

- Per il punto di I/O uniformemente distribuito nel fronte:

$$T_1 = \frac{J}{3} * \frac{l_c}{v} + \frac{C}{2} * \frac{w_c}{v} \qquad \text{(eqz. 3.7)}$$

Punto di I/O uniformemente distribuito è come dire che tutti i punti di I/O sono posizionati sullo stesso lato del magazzino. Nel caso in cui la posizione dei diversi punti I/O non sia sullo stesso lato della scaffalatura si suddivide l'area di base in varie sezioni, ognuna assoggettata ad uno dei punti, si calcola il tempo medio per ogni sottosezione e si procede con la media pesata sull'area stessa. L'impatto a livello temporale della posizione del punto di input output sarà analizzato nella sezione dei casi reali.

Analogamente per il tempo necessario a tornare dalla locazione alla porta.
Per quanto riguarda il tempo di prelievo del contenitore si può scrivere:

$$T_2 = \left[\sum_{i=1}^{i=\frac{N}{2}}(i-1)\right] * \frac{1}{2} * 2 * \frac{w_c+l_c}{2*v} + \left[\sum_{i=1}^{i=\frac{N}{2}}(i-1)\right] * 2 * \frac{h_c}{v_z} \qquad \text{(eqz. 3.8)}$$

Nel primo addendo è stata aggiunta l'equiprobabilità che il robot possa risistemare i bin sia muovendosi in direzione x che in direzione y mediante il fattore ($\frac{w_c+l_c}{2}$), mentre si moltiplica per ½ ipotizzando che vi siano due direzioni libere per rimescolare i contenitori, permettendo così al robot di dimezzare la strada da percorrere per depositarli tutti. Quindi il tempo di recupero medio si può scrivere come:

$$T = 2 * T_1 + \left[\sum_{i=1}^{i=\frac{N}{2}}(i-1)\right] * \frac{1}{2} * 2 * \frac{w_c+l_c}{2*v} + \left[\sum_{i=1}^{i=\frac{N}{2}}(i-1)\right] * 2 * \frac{h_c}{v_z} + \frac{N*h_c}{v_z}$$

### 3.3.3 Forma ottima

Per calcolare la forma ottima è necessario impostare la posizione del punto di I/O, che è posizionato in basso a sinistra. Inoltre nei primi calcoli si immagina di conoscere una dimensione dell'area di stoccaggio e la potenzialità ricettiva (J*C*N=k). La forma ottima in questi primi calcoli è studiata per una logica di allocazione della merce random.

1. Nel caso sia nota l'altezza, ossia il numero di livelli N, le variabili da ottimizzare per minimizzare la percorrenza, e di conseguenza il tempo di recupero, sono le due dimensioni L e W, ossia J e C. Le due equazioni su cui si lavora sono:

$$\begin{cases} J * C * N = k \\ T = 2 * \frac{J}{2} * \frac{l_c}{v} + \frac{C}{2} * \frac{w_c}{v} + \left[\sum_{i=1}^{i=\frac{N}{2}} (i-1)\right] * \frac{1}{2} * 2 * \frac{w_c + l_c}{2 * v} + \left[\sum_{i=1}^{i=\frac{N}{2}} (i-1)\right] * 2 * \frac{h_c}{v_z} + \frac{N * h_c}{v_z} \end{cases}$$

   Essendo noto N, si decide secondo quale variabile derivare, J o C, sostituendo l'altra variabile nell'equazione del tempo di recupero ricavandola dalla capacità del magazzino, poi si pone la derivata del tempo pari a zero. Si decide di derivare secondo C.

$$\begin{cases} J = \frac{k}{N * C} \\ T = \frac{k * l_c}{v * N * C} + \frac{C * w_c}{v} + T_2 \end{cases} \qquad \text{(eqz. 3.9)}$$

   Se si deriva secondo C, $\partial T_2 / \partial C = 0$, quindi:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial C} = 0 \\ \frac{w_c}{v} + \frac{k * l_c}{v * N} * \left(-\frac{1}{C^2}\right) = 0 \end{cases} \qquad \text{(eqz. 3.10)}$$

   da cui si ricava:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{w_c * N}{k * l_c}$$

   continuando si ottiene:

$$C = \sqrt{\frac{k * l_c}{w_c * N}} \quad \text{e} \quad J = \frac{k}{N * \sqrt{\frac{k * l_c}{w_c * N}}} \qquad \text{(eqz. 3.11, 3.12)}$$

   da cui il rapporto ottimo tra le due dimensioni:

$$\frac{C}{J} = \frac{l_c}{w_c} \qquad \text{(eqz. 3.13)}$$

ossia l'inverso delle dimensioni dei vani di stoccaggio, cosicché da ottenere una pianta di forma quadrata, in accordo con la teoria dei magazzini manuali che presentano i movimenti in x e y disaccoppiati come avviene per i robot di AutoStore. Diversi rapporti ottimali si ottengono a seconda della posizione di I/O prescelta.

2. Nel secondo caso che si andrà ad analizzare, i dati noti sono il numero totale dei vani (J*C*N) e una dimensione della base del volume di stoccaggio. Si ricorda che si è impostato una logica di deposito random e il punto di I/O posizionate in basso a sinistra.
   Si assume come variabile nota J quindi si può ricavare facilmente l'espressione valida per C $C = \frac{k}{N*J}$ . Introducendola nell'espressione del tempo di recupero si ottiene:

$$T = \frac{J*l_c}{v} + \frac{k}{N*J} * \frac{w_c}{v} + \left[\sum_{i=1}^{i=\frac{N}{2}}(i-1)\right] * \frac{1}{2} * 2 * \frac{w_c+l_c}{2*v} + \left[\sum_{i=1}^{i=\frac{N}{2}}(i-1)\right] * 2 * \frac{h_c}{v_z} + \frac{N*h_c}{v_z}.$$

   Raccogliendo ed evidenziando la variabile N:

$$T = \frac{J*l_c}{v} + \frac{k*w_c}{v*J} * \frac{1}{N} + \left[\sum_{i=1}^{i=\frac{N}{2}}(i-1)\right] * \left(\frac{w_c+l_c}{2*v} + 2 * \frac{h_c}{v_z}\right) + \frac{N*h_c}{v_z} \qquad \text{(eqz. 3.14)}$$

   Ricordando dalla teoria delle serie che:

$$\sum_{i=1}^{n} k = \frac{n*(n+1)}{2}$$

   Si può scrivere:

$$\sum_{i=1}^{i=\frac{N}{2}}(i-1) = \frac{\frac{N}{2}*(\frac{N}{2}-1)}{2}$$

   e sostituendo all'interno dell'equazione iniziale:

$$T = \frac{J*l_c}{v} + \frac{k*w_c}{v*J} * \frac{1}{N} + \frac{\frac{N}{2}*\left(\frac{N}{2}-1\right)}{2} * \left(\frac{w_c+l_c}{2*v} + 2 * \frac{h_c}{v_z}\right) + \frac{N*h_c}{v_z} \qquad \text{(eqz. 3.15)}$$

   Si può ora derivare T secondo N:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial N} = 0 \\ \frac{N^3*\left(\frac{w_c+l_c}{2*v}+\frac{2*h_c}{v_z}\right)-N^2*\left(\frac{w_c+l_c}{2*v}+\frac{2*h_c}{v_z}-\frac{4*h_c}{v_z}\right)-4*\frac{k+w_c}{J*v}}{4*N^2} = 0 \end{cases} \qquad \text{(eqz. 3.16)}$$

   Risolvendo secondo N:

$$N^2 * \left(N * \left(\frac{w_c+l_c}{2*v} + \frac{2*h_c}{v_z}\right) - \frac{w_c+l_c}{2*v} + \frac{2*h_c}{v_z} + \frac{4*h_c}{v_z}\right) = 4 * \frac{k+w_c}{J*v}$$

di conseguenza, tralasciando le due soluzioni N=0:

$$N = \left(4 * \frac{k+w_c}{J*v} + \frac{w_c+l_c}{2*v} + \frac{2*h_c}{v_z} - \frac{4*h_c}{v_z}\right) / \left(\frac{w_c+l_c}{2*v} + \frac{2*h_c}{v_z}\right) \quad \text{(eqz. 3.17)}$$

E sostituendo la soluzione trovata per trovare C:

$$C = \frac{k}{\left[\left(4*\frac{k+w_c}{J*v}+\frac{w_c+l_c}{2*v}+\frac{2*h_c}{v_z}-\frac{4*h_c}{v_z}\right)/\left(\frac{w_c+l_c}{2*v}+\frac{2*h_c}{v_z}\right)\right]*J} \quad \text{(eqz. 3.18)}$$

### 3.3.4 Potenzialità di movimentazione oraria di un robot

Per poter calcolare la potenzialità di movimentazione oraria è necessario stimare il tempo ciclo, semplice o combinato, di un robot. Per fare ciò in letteratura ci sono vari riferimenti come le norme FEM 9851 oppure altri metodi tra i quali il più diffuso è quello di Bozer e White.
Entrambi questi metodi fondano la loro validità su assunzioni di partenza che è necessario specificare:

- equiprobabilità di accesso ai vani;
- scaffalatura descritta come dominio continuo e non discreto.

Grazie a tali metodi è quindi possibile ricavare una stima delle potenzialità di movimentazione del robot, quindi dell'intero sistema passando per il numero di robot utilizzati, oppure calcolare il numero di robot necessari conoscendo la potenzialità di movimentazione richiesta al magazzino.
Chiaramente una valutazione più attenta e precisa di tali prestazioni non può prescindere da un modello di simulazione ove sia possibile, ad esempio, simulare e confrontare diverse strategie di allocazione della merce.
Data la particolarità del sistema AutoStore si sceglie di procedere con la norma F.E.M. 9851, inoltre è utile notare che grazie al sistema di controllo wireless tutti i cicli dei robot sono combinati.
Un ciclo combinato nel sistema di stoccaggio AutoStore prevede il raggiungimento della prima locazione, deposito del contenitore in cima alla pila, traslazione verso la seconda locazione, rimescolamento fino a raggiungere il Bin richiesto, ritorno al punto di I/O.
Le norme F.E.M. 9851 indicano la posizione di due colonne rappresentative di tutta la griglia, inoltre per adattare le norme al sistema in esame si assume che i vani selezionati siano al livello medio. Per semplicità si considera il sistema discreto e l'equiprobabilità che le merci vengano stoccate nei vani.
Ad esempio per la configurazione con punto di I/O in basso a sinistra rispetto alla base del volume di stoccaggio visto dall'alto si ha che:

$$\begin{cases} x_{P1} = {}^{1}/_{5} * L \\ y_{P1} = {}^{2}/_{3} * W \end{cases} \quad \text{e} \quad \begin{cases} x_{P2} = {}^{2}/_{3} * L \\ y_{P2} = {}^{1}/_{5} * W \end{cases} \qquad \text{(eqz. 3.19, 3.20)}$$

Passando al dominio temporale:

$$P_1 = \left(\frac{x_{P1}}{v}; \frac{y_{P1}}{v}\right) \quad \text{e} \quad P_2 = \left(\frac{x_{P2}}{v}; \frac{y_{P2}}{v}\right) \qquad \text{(eqz. 3.21, 3.22)}$$

Quindi il tempo medio per un ciclo combinato in un sistema AutoStore risulta:

$$Tm_{(CC)} = \left\{\frac{N * hc}{v_z} + \frac{x_{P1}}{v} + \frac{y_{P1}}{v} + \frac{N}{2} * 2 * \frac{h_c}{v_z}\right\} + \left\{\frac{|x_{P1} - x_{P2}|}{v} + \frac{|y_{P1} - y_{P2}|}{v}\right\} + \left\{\left[\sum_{i=1}^{i=\frac{N}{2}} (i-1)\right]\left(\frac{w_c + l_c}{2 * v} + 2 * \frac{h_c}{v_z}\right) + \frac{x_{P2}}{v} + \frac{y_{P2}}{v} + \frac{N * hc}{v_z}\right\}$$

(eqz 3.23)

Dove:

$\frac{N*hc}{v_z} + \frac{x_{P1}}{v} + \frac{y_{P1}}{v} + \frac{N}{2} * 2 * \frac{h_c}{v_z}$ rappresenta il tempo necessario per prelevare il bin dalla postazione di I/O, arrivare alla locazione di allocazione e depositarlo;

$\frac{|x_{P1}-x_{P2}|}{v} + \frac{|y_{P1}-y_{P2}|}{v}$ rappresenta il tempo necessario per spostarsi dalla locazione 1 alla locazione 2;

$\left[\sum_{i=1}^{i=\frac{N}{2}}(i-1)\right] * \left(\frac{w_c+l_c}{2*v} + 2 * \frac{h_c}{v_z}\right) + \frac{x_{P2}}{v} + \frac{y_{P2}}{v} + \frac{N*hc}{v_z}$ rappresenta il tempo di rimescolamento necessario a raggiungere il bin da prelevare, agganciarlo, traslare dalla locazione 2 al punto di I/O e depositare il contenitore.

Una volta ottenuto il tempo medio per un ciclo combinato si può ricavare la potenzialità di movimentazione oraria di un robot. E' necessario considerare anche il tempo dovuto alla risistemazione dei bin rimescolati e un fattore moltiplicativo 1.2 sia per prevedere il tempo di ricarica delle batterie dei robot, sia per avere un dato livello di servizio:

$$PM_{robot} = \frac{3600}{1.2 * \left\{Tm_{(CC)} + \left[\sum_{i=1}^{i=\frac{N}{2}}(i-1)\right] * \left(\frac{w_c+l_c}{2*v} + 2*\frac{h_c}{v_z}\right)\right\}} \qquad \text{(eqz 3.24)}$$

$$N°_{robot} = \frac{PM_{richiesta}}{PM_{robot}} \qquad \text{(eqz. 3.25)}$$

# CAPITOLO IV
# TORNADO MINILOAD CRANE

## 4.1 I sistemi Miniload

I magazzini automatici Miniload (figura 4.1), concepiti in base al principio "*Parts-to-picker*", sono nati per soddisfare l'esigenza dello stoccaggio e della movimentazione di minuteria. Il magazzino è costituito da una o più corsie, all'interno delle quali si muovono i trasloelevatori. Su entrambi i lati sono presenti le scaffalature per immagazzinare contenitori quali vassoi o scatole. I contenitori possono essere di materiali e dimensioni diverse, purché garantiscano la rigidità e la stabilità del carico. Nella maggior parte dei casi ad ogni corridoio viene dedicato un trasloelevatore, ma non è da escludere il caso in cui il numero di trasloelevatori sia minore del numero di corridoi e, quindi, il singolo trasloelevatore debba servire più corridoi: in tal caso, per consentire il passaggio dei trasloelevatori da un corridoio all'altro, è necessario installare un sistema di scambi su rotaie o un opportuno ponte di trasbordo.

***Fig. 4.1.*** *Sistema miniload Tornado di Swisslog*

Le macchine per la movimentazione automatica vengono attrezzate, a seconda della necessità, con unità per l'estrazione, il prelievo e il sollevamento automatici. Ciascuna macchina può essere equipaggiata con più unità di questo tipo, in modo da aumentarne l'efficienza e ottimizzare i costi d'esercizio. Questa tipologia di magazzino come descritto nel paragrafo precedente è particolarmente indicata per la risoluzione di problematiche relative al *picking* in asservimento a linee di montaggio o al reparto di spedizione; un ulteriore applicazione si riferisce all'archiviazione/

consultazione di documenti per enti pubblici e banche.
Tutti gli articoli presenti nel magazzino miniload vengono gestiti tramite sistemi informatici, prelevati automaticamente dalle scaffalature ed inviati alle postazioni di allestimento ordini tramite un sistema automatico di movimentazione. L'ubicazione di tutti i materiali collocati nel magazzino è memorizzata da un software che controlla e gestisce l'allocazione della merce e rende disponibile un inventario in tempo reale.
Questi magazzini vengono progettati secondo tolleranze molto rigide, per questo motivo richiedono la massima precisione al momento della realizzazione. Vengono progettati per lo stoccaggio a una o più posizioni, in sistemi a ripiani o a canali di scorrimento.

*Principali caratteristiche:*

- Sfruttamento ottimale dello spazio, grazie all'alta densità di stoccaggio;
- Elevata accessibilità ai carichi;
- Aumento della produttività rispetto a una gestione tradizionale;
- Totale sicurezza durante i processi di movimentazione dei carichi, dal momento che non vi è bisogno della presenza di operatori all'interno della zona di stoccaggio;
- Protezione del prodotto;
- Struttura portante in materiali leggeri (alluminio)
- Affidabilità e semplicità di utilizzazione;
- Ridotti costi di manutenzione;
- Motori e azionamento a risparmio energetico;
- Particolarmente indicato per aziende con elevato numero di ordini da evadere;
- Applicabile alla maggior parte dei settori: farmaceutico, laboratori e cosmetica, amministrazione pubblica, automobilistico, utensileria, elettrodomestici, telefonia e comunicazione;
- Riduzione del tempo di preparazione degli ordini;
- Ritorno rapido dell'investimento;
- Rispetto ambientale;
- Minore specializzazione del personale.

### 4.1.1 Organi di presa

Negli ultimi anni le continue innovazioni e l'inserimento di nuove tecnologie ha permesso di sviluppare trasloelevatori con performance sempre più elevate sotto tutti i punti di vista.
L'obbiettivo di questo sviluppo è la diminuzione del tempo ciclo, per questo le macchine sono

diventate sempre più veloci e rapide grazie a motori più piccoli e potenti, diminuendo pesi e ingombri delle strutture portanti.
All'interno di questa area di sviluppo sono state inserite delle grandi novità anche per quanto riguarda i meccanismi di presa dei trasloelevatori, ovvero gli organi attraverso i quali viene effettuato il carico e lo scarico delle UdC dalla scaffalatura. Inizialmente le forche telescopiche costituivano la grande maggioranza delle soluzioni per i trasloelevatori, negli ultimi anni soprattutto per quanto riguarda colli, vassoi e cartoni sono apparse sul mercato diverse soluzioni innovative.
È possibile installare vari tipi di sistemi di estrazione secondo la tipologia delle UdC che vengono stoccate nel Miniload.
Possiamo classificare gli organi di presa in due grandi gruppi:

- Estrattori per contenitore singolo;
- Estrattori per due contenitori in simultanea.

*Estrattori singolo contenitore*

- Estrattore a forca telescopica: la forca telescopica è composta da due corpi che scorrono su guide e cuscinetti a lunga durata. L'azionamento si effettua mediante ingranaggi e catene di trascinamento. La grande resistenza alla torsione degli accoppiamenti garantisce uno spostamento uniforme limitando la freccia e con un elevato carico all'estremità.
- Estrattore a forca con cingolo motorizzato (Figura 2.15): Dispositivo costituito da una piattaforma telescopica e da un sistema di cingoli che prelevano il carico trascinandolo allo stesso tempo. Consta di due motorizzazioni dedicate all'azionamento di ciascuno dei due sistemi di cingoli (azionamento telescopico; azionamento di trascinamento). Si tratta di un azionamento rapido e dinamico che serve per lavorare su entrambi i lati della scaffalatura a singola profondità.
- Estrattore a ventose: Sistema provvisto di ventose montate su un braccio telescopico elettrico. Le ventose generano il vuoto su un lato della cassa di cartone, afferrandola saldamente tanto per l'estrazione quanto per il carico. Al tempo stesso, le pinze laterali abbracciano la cassa senza esercitare pressioni, per evitare che essa si muova lateralmente, accompagnandola verso la culla sul trasloelevatore. Il dispositivo telescopico con ventose va installato su una piattaforma girevole, che permette di effettuare l'estrazione su entrambi i lati della corsia e anche su un terzo lato frontale in caso di necessità. Questo sistema realizza lo stoccaggio di casse di differenti dimensioni, in doppia profondità.

- Estrattore di tipo “cantilever” o sistema a pettine: l'organo di presa è costituito da un pettine, i denti del quale passano tra la struttura della scaffalatura sollevando l'UdC da sotto e consentendo di caricarla a bordo del trasloelevatore.

*Estrattori doppi*

- Estrattore a forca combinata (Figura 2.16): formato da due elementi estrattori che conferiscono una elevata velocità al processo di estrazione e introduzione di due o addirittura quattro contenitori simultaneamente. Questo tipo di estrattore dispone di una piattaforma telescopica nel centro di un trasportatore a cingolo. La velocità dei cingoli si sincronizza con il movimento del contenitore in fase di carico e scarico. I cingoli posizionati a 2 mm al di sopra della piattaforma telescopica permettono di spostare i contenitori da un lato all'altro delle scaffalatura e in profondità nel vano, senza necessità di muovere la piattaforma. Inoltre, i cingoli consentono un elevata velocità di carico e scarico dei due contenitori in modo continuo nella testata. Ciò rende il sistema altamente flessibile e incrementa la velocità dei processi.
- Estrattore a pinze laterali e denti ripiegabili: è un sistema che rende possibile movimentare due contenitori di cartone in modo simultaneo tanto sulle scaffalature quanto in testata. È costituito da un sistema di piattaforme verticali telescopiche nelle quali sono alloggiate alcune biellette inclinabili. Quando le biellette di trovano in posizione orizzontale, afferrano le casse (una o due unità) per estrarle o spingerle. Questo movimento è simultaneo alla rotazione dei cingoli di gomma che formulano la base del sistema di estrazione. Questi due trasportatori indipendenti sincronizzano il proprio movimento con le piattaforme verticali. Essendo autonome, consentono il movimento del contenitore a bordo della macchina per cambiargli di lato o fondo scaffalatura. Il grande vantaggio di questo elemento di estrazione consta della capacità di gestire casse di cartone direttamente sulla scaffalatura. Come opzione, il dispositivo può montare un sistema di adattamento per differenti dimensioni di casse, questo lo rende molto versatile nelle installazioni in cui è richiesta la movimentazione di contenitori di cartone di differenti dimensioni.

## 4.2 Swisslog Tornado Miniload Crane

Il sistema presentato da Swisslog, il Tornado miniload, combina elevata movimentazione, efficienza energetica senza pari, funzionamento e affidabilità ai massimi livelli.
Il design brevettato di montanti e rotaie consentono un elevato utilizzo del volume di stoccaggio e può essere dedicato per una vasta gamma di applicazioni.

I benefici ottenibili grazie all'implementazione di questo tipo di magazzino sono una elevata movimentazione grazie ad un processo di posizionamento veloce e accurato ottenuto mediate il design dedicato e i motopropulsori ottimizzati; una elevata affidabilità del sistema in quanto guide e montati in alluminio evitano di gravare troppo sulla struttura; un risparmio energetico quantificabile fino al 20% grazie alla leggerezza di tutti i componenti e alla tecnologia di movimentazione; un layout di magazzino compatto ottenuto mediante altezze di stoccaggio piuttosto elevate (permesse dalle elevata rigidità del montante) e la massimizzazione del volume di immagazzinamento dovuta al design ottimizzato in pianta e della struttura intera; una elevata adattabilità ai progetti di retrofit.

### 4.2.1 Caratteristiche generali

- Griglia di base modulare e scalabile per una facile ottimizzazione delle diverse unità di movimentazione del carico e dell'altezza della navata laterale;
- Design leggero con componenti in alluminio di qualità aeronautica ad alta resistenza
- Pianta brevettata e design della guida superiore studiati per una facile installazione in loco e un preciso allineamento navata.

### 4.2.2 Elettricità e controlli

- La trasmissione della potenza avviene attraverso linee conduttrici evitando i problemi di eccessiva usura dei cavi e di oscillazione dovuti ai movimenti ad alta velocità;
- Presenta una soluzione avanzata di sicurezza per il funzionamento semplice e sicuro tra cui un sistema di diagnostica completa;
- Le schermate di controllo e quelle dedicate all'operatore sono totalmente integrate con le soluzioni software di magazzino implementate da Swisslog, questo per facilitare l'utilizzo e la diagnostica.

### 4.2.3 Struttura, guide e montanti

- Il particolare accoppiamento, compatto e brevettato, tra ruota e rotaia permette il pieno utilizzo dell'altezza di stoccaggio;
- Ottimizzazione di telaio e montanti, sia per quanto riguarda il design che i materiali, per ottenere una elevata rigidità e affidabilità;
- Posizionamento rabido e preciso tramite (omega-drive);
- Sistema integrato per la misurazione della posizione assoluta dei vari veicoli per un funzionamento affidabile
- Esiste una versione a bassa emissione di rumore per applicazioni con spazi di lavoro nelle vicinanze;

- Design del montante singolo brevettato; montanti principali ottenuti per estrusione e avvitati successivamente sulle traverse
- L'elevata rigidità dei montanti permette di avere altezze elevate delle scaffalature, senza guide superiori;
- Trasporto di contenitori con sezioni variabili;
- E' prevista una staffa superiore con passo lungo per ridurre lo stress sulla struttura;
- E' prevista una versione con doppio carrello per una maggiore produttività (facoltativo).

### 4.2.4 Sistemi di presa e contenitori

- TelescopeLoader per bin e vassoi. I formati standard sono 400 x 300, 600 x 400, e 800 x 600 millimetri in pianta, ma è possibile customizzare le dimensioni. Sono previste due classi di carico con 70 o 120 kg di carico massimo in modo da ottimizzare lo spazio di immagazzinamento. La scaffalatura può essere a singola, doppia o quadrupla profondità. In fase di carico i contenitori sono guidati da una cinghia indipendente.
- CartonLoader per scatoloni, contenitori e vaschette. Le dimensioni standard vanno da 300 x 200 a 800 x 600 millimetri in pianta e sono comunque personalizzabili. Il carico utile massimo è di 2x35 kg. Sono previste scaffalature a singola o doppia profondità e in fase di carico i cartoni sono guidati da rulli indipendenti.

## 4.3 Modello matematico

### 4.3.1 Introduzione

Il sistema Tornado miniload, è un nuovo tipo di AS / RS, dove le gru sono provviste di multi-shuttle, cioè, rispetto a quelle tradizionali dove le navette trasportano un singolo carico alla volta, le nuove gru multi-navetta possono trasportare più di un carico, tipicamente due o tre (Fig. 1), aumentando così l'efficienza.

A causa delle diverse configurazioni AS/RS possibili e l'alto costo di questi sistemi, particolare attenzione deve essere posta durante il processo di progettazione alle esigenze della domanda presente e futura, al fine di non dover modificare il sistema e massimizzarne i benefici.

Diversi modelli possono aiutare a valutare le prestazioni di tale tipo di magazzino durante il processo di progettazione e lo studio di fattibilità, per lo più si basano sulle formulazioni Bozer e White (Bozer & White, 1984), o sulla normativa FEM 9851 standard (2001). Quest'ultima soluzione è spesso richiesto dalle specifiche di progetto oppure specificata nelle condizioni dei contratti di progettazione. Nella letteratura scientifica, molti tentativi sono stati fatti per modificare il modello Bozer & White (1984) per calcolare le performance dei sistemi AS/RS multi-navetta, ma

i risultati non sono stati soddisfacenti, fino all'introduzione di un innovativo modello dedicato ai dual-shuttle da parte di Persona e il suo gruppo di collaboratori (Azzi et al. 2011). D'altra parte la normativa FEM 9851 standard fornisce modelli semplici, definendo le coordinate parametriche di punti di locazione interessate dai cicli di stoccaggio e prelievo, ma nessuno di questi modelli considera il caso di multi-shuttle AS/RSs.

Le performance di un AS/RS dipendono principalmente dal ciclo di comando che svolgono (Sarker & Babu, 1995). In figura 4.2 sono mostrati i principali cicli di comando per il deposito nelle locazioni S1 e S2, e il ritiro nelle posizioni R1 e R2. Per i single-shuttle AS/RSs, le possibilità sono: ciclo semplice (o singolo) oppure ciclo combinato (o doppio); mentre per un dual-shuttle AS/RSs le possibilità risultano: doppio ciclo semplice (double single command cycle, DSC) oppure ciclo quadruplo (quadruple command cycle, QC).

In letteratura più di un autore ha provato a modellizzare il comportamento di un sistema multi-shuttle, tra i quali si citano Meller e Mungwattana (1995, 1997). Essi hanno stimato il tempo di viaggio sia per un dual-shuttle che per un triple-shuttle, con differenti soluzioni di stoccaggio e prelievo: primo arrivato - primo servito (FCFS), è che la politica più utilizzata in fase di progettazione e studio di fattibilità, mentre la politica vicino più vicino (NN) è correlata alla fase di funzionamento dei sistemi e permette di ridurre il tempo di corsa di totale.

Questi contributi scientifici sono strettamente correlati con le formulazioni di Bozer White(1984) e di tutti gli altri modelli finora sviluppati, ma non considerano la variabile di accelerazione e

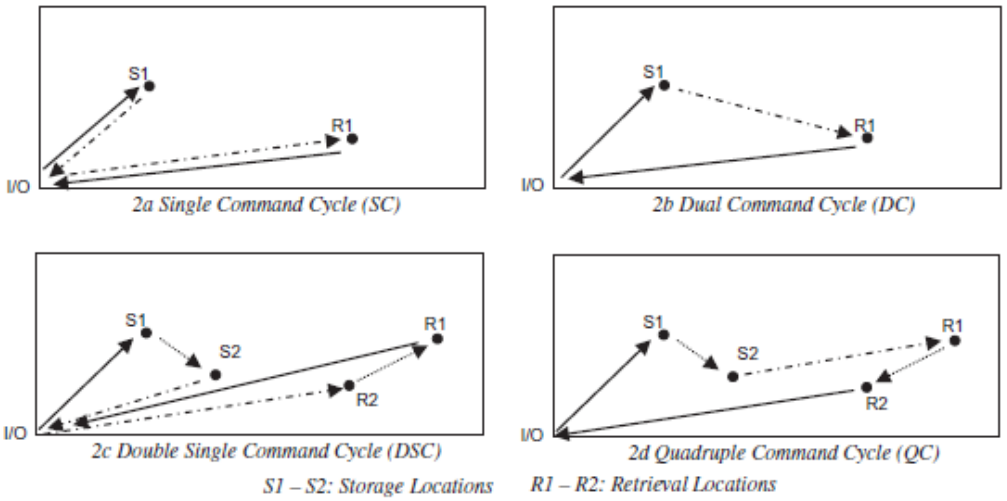


***Fig 4.2**.Cicli di comando per single e dual shuttle.*

decelerazione nel calcolo del tempo di viaggio. Per questo motivo, altri modelli sono stati sviluppati in modo da analizzare tutti gli aspetti cinematici. De Puy (2007) ha esteso il modello di Meller e Mungtwattana per ciascuna politica, applicando la ricerca di Chang et al. (1995) sull'estensione del modello di Bozer e White, che considera accelerazioni e decelerazioni, creando un modello che

meglio si adatta ai valori reali, ma è più complesso da applicare.
In questa tesi però verrà utilizzato il modello introdotto da Azzi, Battini, Faccio, Alessandro Persona, Sgarbossa.

### 4.3.2 Modello per un dual-shuttle basato sulle normative FEM

Il modello sviluppato segue le linee guida fornite dalla *Federation Européenne de la Manutention, in section IX, Series Lifting Equipment, Rules F.E.M. 9851: ''Performance Data of S/R Machines Cycle Times''*. Le regole F.E.M. 9851 sono ampiamente utilizzati da professionisti e ingegneri industriali al fine di svolgere gli studi di fattibilità per future applicazioni di AS/RS perché sono veloci e semplici da usare e i tempi di percorrenza stimati sono vicino ai valori reali. Tali norme consentono di calcolare il tempo di viaggio per le tradizionali single-shuttle AS/RS, introducendo due luoghi virtuali, caratterizzati da coordinate parametriche di lunghezza e altezza in riferimento alla scaffalatura. Le normative standard F.E.M. 9851, comma 6.2, menzionano la possibilità di estendere le formulazioni tradizionali anche al dual-shuttle AS/RS, ma non suggerisce alcune coordinate parametriche per le altre due locazioni servite dal sistema durante il doppio ciclo semplice (double single command cycle, DSC) oppure dal ciclo quadruplo (quadruple command cycle, QC). Per questo motivo, l'obiettivo di questo tale nuovo modello è quello di coprire questo vuoto, introducendo le coordinate parametriche per le due nuove posizioni.
Tipicamente, per verificare la precisione di stima di un nuovo modello sviluppato si ricorre ad una simulazione Monte Carlo.
Nel caso specifico del modello in esame, sono state condotte due simulazioni Monte Carlo variando i parametri cinematici le dimensioni del sistema. La prima simulazione è stato utilizzata per calcolare le coordinate parametriche dei due nuovi punti di locazione, mentre la seconda è stato utile per verificare la precisione del modello introdotto e per consentire il confronto con i diversi modelli basati sulle formule di Bozer e White.
Nella prima simulazione Monte Carlo, 1008 scenari sono stati creati per raccogliere una vasta gamma di valori, 36 diversi profili cinematici e 28 differenti configurazioni di scaffalature sono stati implementati.
Una seconda simulazione Monte Carlo è stato condotta con 10.000 valutazioni per ogni scenario, con quattro posizioni diverse per ogni corsa e il calcolo del tempo di viaggio per completare sia il doppio ciclo semplice e il ciclo quadruplo. Le principali assunzioni riguardano la distribuzione casuale delle unità di carico all'interno della scaffalatura, la politica di stoccaggio utilizzata (primo arrivato primo servito, FCFS) utilizzata per completare il viaggio, e la posizione di I/O posizionata nell'angolo inferiore sinistro.
Quest'ultima ipotesi può essere elusa dividendo in diverse sezioni indipendenti la struttura e stimare

i tempi di percorrenza come media dei tempi di viaggio delle varie aree. Il metodo dei minimi quadrati è stato utilizzato per calcolare i valori delle coordinate parametriche, confrontando il tempo stimato dal modello F.E.M. esteso con i valori ottenuti con la simulazione Monte Carlo. In tabella 4.1 vengono elencate le coordinate parametriche delle norme F.E.M. 9851 modificate per un AS/RSs dual-shuttle. Una volta che le quattro posizioni P1, P2, P3 e P4 sono state individuate, la stima dei tempi di viaggio diventa particolarmente semplice e veloce applicando l'algoritmo che segue.

*Algoritmo F.E.M esteso per un dual-shuttle:*

Innanzitutto si definiscono i parametri del sistema e i parametri cinematici:

- L, lunghezza della scaffalatura [m];
- H, altezza della scaffalatura [m];
- $s_h$, velocità orizzontale [m/s];
- $a_h$, accelerazione orizzontale [m/s²];
- $s_v$, velocità verticale [m/s];
- $a_v$, accelerazione verticale [m/s²].

| **Punto** | **Coordinate** | |
|---|---|---|
| | X | Y |
| I/O | 0 | 0 |
| P1 (dalle norme F.E.M. 9851) | 1/5 L | 2/3 H |
| P2 | 0,38 L | 0,49 H |
| P3 | L | 0,8 H |
| P4 (dalle norme F.E.M. 9851) | 2/3 L | 1/5 H |

***Tab. 4.1.*** *Stima dei coefficienti delle varie locazioni.*

1. Si calcolano le coordinate (Xi; Yi) delle locazioni P1-P4 basandosi sui parametri indicati dalla tabella 4.1;
2. Si calcolano i tempi di viaggio stimati per un AS/RS dual-shuttle:
   $E(DSC)_{FEM}$ = T(I/O-P1) + T(P1-P2) + T(P2-I/O) + T(I/O-P3) + T(P3-P4) + T(P4-I/0) (eqz. 4.1)
   $E(QC)_{FEM}$ = T(I/O-P1) + T(P1-P2) + T(P2-P3) + T(P3-P4) + T(P4-I/0) (eqz. 4.2)

Il tempo tra due qualsiasi locazioni Pi e Pj è calcolato con la formula:

T(Pi-Pj) = max $[T_x(P_i - P_j); T_y(P_i - P_j)]$ (eqz. 4.3)

dove ogni singolo tempo si calcola come segue

- $T_x(P_i - P_j)$:

  se $\frac{s_h^2}{a_h} < |Xi - Xj|$ $\quad T_x(P_i - P_j) = \frac{|Xi-Xj|}{s_h} + \frac{s_h}{a_h}$ (eqz. 4.4)

  se $\frac{s_h^2}{a_h} \geq |Xi - Xj|$ $\quad T_x(P_i - P_j) = 2 * \sqrt{\frac{|Xi-Xj|}{a_h}}$ (eqz. 4.5)

- $T_y(P_i - P_j)$:

  se $\frac{s_v^2}{a_v} < |Yi - Yj|$ $\quad T_y(P_i - P_j) = \frac{|Yi-Yj|}{s_v} + \frac{s_v}{a_v}$ (eqz. 4.6)

  se $\frac{s_v^2}{a_v} \geq |Yi - Yj|$ $\quad T_y(P_i - P_j) = 2 * \sqrt{\frac{|Yi-Yj|}{a_v}}$ (eqz. 4.7)

Tale modello è poi stato comparato con i risultati ottenuti dalla simulazione Monte Carlo. Una serie di funzioni viene introdotta per misurare la validità dello stesso. La deviazione media assoluta (MAD) è definita come la media delle differenze assolute tra i valori stimati dal modello e i valori ottenuti con la simulazione Monte Carlo. La deviazione relativa media (MRD) confronta la differenza tra i valori stimati e i valori ottenuti con la simulazione Monte Carlo, e rappresenta la percentuale di errore del modello. L'ultima funzione di valutazione è la deviazione che è la misura della variabilità o dispersione.
Le seguenti funzioni vengono utilizzate per calcolare l'affidabilità del modello:

$$MAD_j = \sum_i \frac{\left|E_{(c)_{i,j}} - E_{(c)_{i,MC}}\right|}{n} \quad \text{(eqz. 4.8)}$$

$$MRD_j = \frac{1}{n} * \sum_i \frac{\left|E_{(c)_{i,j}} - E_{(c)_{i,MC}}\right|}{T_{i,MC}} \quad \text{(eqz. 4.9)}$$

$$D_j = \sum_i \frac{\left|E_{(c)_{i,j}} - E_{(c)_{i,MC}}\right|^2}{n} \quad \text{(eqz. 4.10)}$$

dove i si riferisce allo scenario, j indica il modello in valutazione, in questo caso le formule F.E.M. estese, e c sta per il doppio ciclo semplice oppure per quello quadruplo.

Introdotto tale modello verrà utilizzato nella sezione successiva per confrontare le prestazioni del Tornado con il sistema AutoStore.

# CAPITOLO V
# CASI STUDIO

## 5.1 Casi reali

### 5.1.1 YellowCube

YellowCube è la soluzione implementata da Swisslog per le poste Svizzere. A causa del forte aumento dell'e-commerce i flussi di merce, e di conseguenza gli utili per le poste, sono in continuo aumento fino a raggiungere il picco di 114 milioni di unità 2014. Velocità e qualità degli ordini, di vitale importanza per l'e-commerce, sono state le priorità nella realizzazione di questo progetto. La soluzione logistica YellowCube, risulta un sistema di stoccaggio e picking compatto, completamente automatizzato e che permette anche a piccole e medie imprese di usufruire dei vantaggi di strutture logistiche non proprie.

Con YellowCube, la Posta è in grado di completare gli ordini dei clienti e procedere alla spedizione. La struttura accetta ordini tramite un link collegato al proprio sistema ERP, e permette la consegna degli oggetti ordinati online senza fare una deviazione attraverso il rivenditore. L'ordine è così espletato molto più rapidamente grazie alla velocità nelle operazioni di deposito e recupero, permettendo consegne next-day, anche se gli ordini arrivano alla fine della giornata. Tale sistema permette anche di gestire resi, se un destinatario vuole restituire un ordine, il pacco passa direttamente da YellowCube, dove Posta Svizzera controlla e gestisce gli elementi.

***Fig. 5.1.*** *Immagine di YellowCube.*

L'installazione YellowCube è basata sul concetto del Click & Pick. Tale soluzione è su misura per le esigenze logistiche dell'e-commerce. Costruito nel corso di un anno, la fase di espansione iniziale della struttura YellowCube occupa 4320 metri cubi di spazio - abbastanza per contenere oltre 32000 bin AutoStore. 35 robot movimentano i bin da e per dieci stazioni di prelievo e di imballaggio posizionate ai lati della struttura di stoccaggio. Il risultato è un sistema in grado di elaborare gli ordini, anche quelli in ritardo, e garantire la consegna per il successivo giorno lavorativo ed inoltre la griglia è completamente scalabile per future espansioni.
Nella fase attuale, la potenzialità di movimentazione è di 70 bin/h per ogni stazione di I/O, e la potenzialità massima prevista per le successive espansioni è di 240 bin/h per stazione.
A differenza di molti altri progetti AutoStore completati da Swisslog, uno dei requisiti più importanti per il team di progetto è stato interfacciare l'impianto YellowCube al SAP EWM del sistema logistico già presente (Extended Warehouse Management).

| **Autostore** | |
|---|---|
| Dimensioni della griglia | 40 x 18 x 6 [m] |
| Numero di robot | 35 |
| Numero di bin | 32000 |
| Numero porte I/O | 10 |

| | |
|---|---|
| Dimensioni bin | 601 x 401 x 310 [mm] |
| **Velocità** | |
| Movimento orizzontale | 3 [m/s] |
| Movimento verticale | 1,6 [m/s] |
| Movimentazione oraria | 700 [bin/h] |

***Tab. 5.1.*** *Dati del caso reale YellowCube.*

Partendo dai dati reali sono state applicate le formule presentate nel terzo capitolo in modo tale da confrontare i risultati e da verificare l'attendibilità delle stesse. Inoltre sono state eseguite delle simulazioni Monte Carlo per verificare l'attendibilità del Tm(cc) dell'impatto delle velocità e del numero di livelli del magazzino.
Nell'applicare le formule sono stati presi tre accorgimenti di fondamentale importanza:

1. Le velocità sono assunte con valore minore rispetto a quelle indicate dall'installatore in quanto quelle sono velocità massime a cui lavorano i robot e non tengono conto né del peso dei bin né delle fasi di accelerazione e decelerazione.
2. Alle dimensioni interne dei bin sono stati sommati lo spessore degli stessi e le dimensioni di montanti e traverse al fine di calcolare correttamente le misure totali dei vani di stoccaggio;
3. Nel calcolo della potenzialità di movimentazione del singolo robot il tempo medio per un viaggio, Tm(cc), viene moltiplicato per un fattore 1,2 che sopperisce alla mancanza del tempo di ricarica delle batterie, all'incertezza dei movimenti necessari al rimescolamento dei bin movimentati ma non richiesti e garantisce una certa copertura in caso di rottura di uno o più robot.
   La formula utilizzata è quindi:

$$PM_{robot} = \frac{3600}{1.2*\left(Tm_{(CC)}+\left[\sum_{i=1}^{i=\frac{N}{2}}(i-1)\right]*\left(\frac{w_c+l_c}{2*v}+2*\frac{h_c}{v_z}\right)\right)} \qquad \text{(eqz. 5.1)}$$

Inoltre, per facilità di calcolo si è suddiviso il tempo medio per un ciclo combinato in tre parti:

$$Tm_{(CC)1} = \left\{\frac{N*hc}{v_z}+\frac{x_{P1}}{v}+\frac{y_{P1}}{v}+\frac{N}{2}*2*\frac{h_c}{v_z}\right\}$$

$$Tm_{(CC)2} = \left\{\frac{|x_{P1}-x_{P2}|}{v}+\frac{|y_{P1}-y_{P2}|}{v}\right\}$$

$$Tm_{(CC)3} = \left\{\left[\sum_{i=1}^{i=\frac{N}{2}}(i-1)\right]\left(\frac{w_c+l_c}{2*v}+2*\frac{h_c}{v_z}\right)+\frac{x_{P2}}{v}+\frac{y_{P2}}{v}+\frac{N*hc}{v_z}\right\}$$

| Dato | | | T1 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| **J** | 55 | [bin] | I/O sx | 11,456 | [s] |
| **C** | 34 | [bin] | I/O centro | 7,496 | [s] |
| **N** | 20 | [bin] | I/0 distribuito | 8,816 | [s] |
| | | | | | |
| **lc** | 0,72 | [m] | **T3** | | |
| **wc** | 0,52 | [m] | | | |
| **hc** | 0,32 | [m] | I/O sx | 17,856 | [s] |
| | | | I/O centro | 13,896 | [s] |
| **L** | 40 | [m] | I/0 distribuito | 15,216 | [s] |
| **W** | 18 | [m] | | | |
| **H** | 6,4 | [m] | **T2** | 39,96 | [s] |
| | | | | | |
| **v** | 2,5 | [m/s] | **Tempo Medio** | | |
| **vz** | 1,0 | [m/s] | | | |
| | | | I/O sx | 69,272 | [s] |
| **tl** | 40,00 | [s] | I/O centro | 61,352 | [s] |
| **tw** | 7,20 | [s] | I/0 distribuito | 63,992 | [s] |
| **th** | 6,40 | [s] | | | |
| | | | **Tm(cc)** | | |
| **Xp1** | 8,00 | [m] | | | |
| **Yp1** | 12,00 | [m] | Tm(cc)1 | 20,800 | [s] |
| **Xp2** | 26,67 | [m] | Tm(cc)2 | 10,827 | [s] |
| **Yp2** | 3,60 | [m] | Tm(cc)3 | 58,467 | [s] |
| | | | | | |
| | | | Tm(cc) | 90,093 | [s] |
| | | | | | |
| | | | **PR** | 37400 | [bin] |
| | | | **PMrobot** | 23,067 | [bin/h] |
| | | | | | |
| | | | **PMmag** | 700 | [bin/h] |
| | | | | | |
| | | | **Nrobot** | 31 | [robot] |

***Tab. 5.2****. Risultati ottenuti applicando le formule presentate nel terzo capitolo.*

### 5.1.2 Antalis

Antalis è leader nella distribuzione di carta e materiale da imballaggio in Europa.

L'elevata gamma di prodotti di alta qualità distribuiti da Antalis include carta e supporti cartacei, forniture per ufficio, materiali da imballaggio, prodotti per l'igiene, prodotti per la comunicazione visiva e soluzioni logistiche personalizzate. In seguito ai cambiamenti strutturali che si sono verificano nel mercato della carta, Antalis Svizzera si è imposta di espandere in modo permanente i propri servizi di logistica, una funzione che era già una priorità del distributore. Swisslog ha

lavorato in partnership con Antalis in ogni fase, dalla progettazione alla messa in servizio del nuovo magazzino. Il sistema è stato modificato e ottimizzato per soddisfare i requisiti Antalis, inoltre è stato fornito supporto software e, come general contractor, Swisslog si è assunta tutti i compiti di gestione del progetto.

La messa in opera del nuovo sistema è avvenuta in sole tre settimane, mentre il centro logistico era in piena attività. Inoltre la capacità di consegna e le prestazioni logistiche di Antalis sono stati costanti per tutta la durata del progetto. Dopo un periodo di implementazione di soli otto mesi, Antalis ha potuto avviare il suo sistema AutoStore per lo stoccaggio di piccole parti nel novembre 2011.

La flessibilità del layout a griglia di AutoStore consente di adattarsi ai vincoli strutturali. Quindi nel caso Antalis, il sistema è stato integrato con facilità nella zona del magazzino esistente, e offre differenti opzioni per future espansioni.

Il numero di robot che viaggiano sulla rete dipende essenzialmente dalla configurazione AutoStore e numero di bin/ora richiesti per ogni porto, inoltre il sistema è particolarmente flessibile poiché più veicoli possono essere aggiunti in qualsiasi momento. I robot utilizzano una LAN senza fili per comunicare tra loro e con il sistema di controllo. Le infrastrutture logistiche Antalis sono ospitate in un edificio di 40 000 metri quadri che offre spazio per 55 000 locazioni di stoccaggio per europallet e 20 000 posizioni per stoccare i bin. 28 000 posizioni di immagazzinamento dei pallet sono completamente automatizzati. I pallet sono movimentati da un totale di dieci trasloelevatori Swisslog e di un sistema di 13 veicoli a guida automatica che servono anche il magazzino AutoStore. Il magazzino 3D è stato integrato in una zona di magazzino con una griglia di colonne 10x10 m che precedentemente ospitava scaffalature. Con un ingombro di soli 400 mq, AutoStore ospita 18 000 bidoni di plastica, ciascuno con una capacità di 75 litri e un peso massimo di 30 kg. Gli oggetti che arrivano sui veicoli a guida automatica sono collocati nelle posizioni di deposito oppure presentati per le operazioni di picking in quattro diversi punti di I/O. Gli scomparti sono gestiti da 10 robot. L'integrazione SAP completa consente un accesso ai clienti interni ed esterni di Antalis in modo tale che possano far partire un commissionamento. Gli ordini vengono poi consegnati nel tempo previsto, che di solito è il giorno stesso o quello lavorativo successivo.

| **Autostore** | |
|---|---|
| Area/Volume | 433[m²]/2300[m³] |
| Numero di robot | 10 |
| Numero di bin | 18000 |
| Numero porte I/O | |

| | |
|---|---|
| Dimensioni bin | 600 x 400 x 330 [mm] |
| **Velocità** | |
| Movimento orizzontale | 3 [m/s] |
| Movimento verticale | 1,6 [m/s] |
| Movimentazione oraria | 230 [bin/h] |

***Tab. 5.3.*** *Dati del caso reale Antalis.*

| **Dato** | | | **T1** | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| **J** | 28 | [bin] | I/O sx | 8,192 | [s] |
| **C** | 40 | [bin] | I/O centro | 6,176 | [s] |
| **N** | 18 | [bin] | I/0 distribuito | 6,848 | [s] |
| | | | | | |
| **lc** | 0,72 | [m] | **T3** | | |
| **wc** | 0,52 | [m] | | | |
| **hc** | 0,36 | [m] | I/O sx | 14,672 | [s] |
| | | | I/O centro | 12,656 | [s] |
| **L** | 20,8 | [m] | I/0 distribuito | 13,328 | [s] |
| **W** | 20,8 | [m] | | | |
| **H** | 6,8 | [m] | **T2** | 34,848 | [s] |
| | | | | | |
| **v** | 2,5 | [m/s] | **Tempo Medio** | | |
| **vz** | 1,0 | [m/s] | | | |
| | | | I/O sx | 57,712 | [s] |
| **tl** | 20,80 | [s] | I/O centro | 53,680 | [s] |
| **tw** | 8,32 | [s] | I/0 distribuito | 55,024 | [s] |
| **th** | 6,80 | [s] | | | |
| | | | **Tm(cc)** | | |
| **Xp1** | 4,16 | [m] | | | |
| **Yp1** | 13,87 | [m] | Tm(cc)1 | 20,171 | [s] |
| **Xp2** | 13,87 | [m] | Tm(cc)2 | 7,765 | [s] |
| **Yp2** | 4,16 | [m] | Tm(cc)3 | 48,537 | [s] |
| | | | | | |
| | | | Tm(cc) | 76,475 | [s] |
| | | | | | |
| | | | **PR** | 20000 | [bin] |
| | | | **PMrobot** | 26,95 | [bin/h] |
| | | | | | |
| | | | **PMmag** | 230 | [bin/h] |
| | | | | | |
| | | | **Nrobot** | 9 | [robot] |

***Tab. 5.4.*** *Risultati ottenuti applicando le formule presentate nel terzo capitolo.*

### 5.1.3 ASDA, UK

Fondata nel 1960, ASDA è oggi uno dei principali rivenditori britannici con oltre 180.000 dipendenti che servono 18 milioni di clienti. Rappresenta la seconda più grande catena di supermercati del Regno Unito, occupando una quota di mercato intorno al 18%, ASDA fa anche parte del gruppo Wal-Mart, la più grande catena di vendita al dettaglio del mondo.
La maggior parte dei negozi di ASDA sono aperti 24 ore al giorno, e anche nelle ore più tarde i clienti si aspettano di trovare tutto ciò che stanno cercando. ASDA ritiene che applicare le tecniche e tecnologie avanzata nel magazzino e per gestire il trasporto su strada li aiuti risponde a questa sfida round-the-clock e mantenere gli scaffali riforniti 24 ore al giorno, 7 giorni a settimana.
Con oltre 550 negozi in tutto il Regno Unito, vendendo più di 75.000 prodotti tra cui generi alimentari, abbigliamento, articoli per la casa e l'elettronica, ASDA è ovviamente uno dei principali promotori dell'innovazione nel campo dei magazzini e della logistica.
La ricerca è costante per trovare i modi migliori per l'utilizzo dello spazio all'interno dei propri centri di distribuzione già esistenti. Il Lutterworth IDC non ha fatto eccezione, già uno dei più complessi depositi della rete logistica.
ASDA ha scelto la soluzione di Swisslog AutoStore per gestire una gamma dei suoi prodotti in modo efficiente e migliorare l'indice di saturazione, in più permette eventuali future espansioni.
Come per i casi precedenti, Swisslog ha lavorato con ASDA ad ogni in ogni fase dell'implementazione: dal progetto iniziale, passando per l'installazione, finendo con la consulenza e il supporto post-vendita.
I lavori sono iniziati in loco nel 2012. Prima dell'installazione del sistema di AutoStore è stato costruito un robusto piano rialzato sopra il quale è poi stata sviluppata la griglia del sistema AutoStore. Una volta che il lavoro di preparazione è stata completata, l'installazione e la messa a punto avuto luogo nel giro di pochi mesi, mentre il resto del IDC era in piena attività.
I pallet merci in ingresso vengono convogliati automaticamente a una delle sei stazioni ergonomiche di attesa. Un dipendente ASDA lavora in ognuna di queste stazione e trasferisce i prodotti dal pallet ai contenitori AutoStore, mentre tavole elevatrici permettono all'operaio di prelevare e depositare i vari articoli senza doversi chinare, rendendo in tal modo l'intero processo altamente ergonomico. Ogni stazione ha anche uno scivolo per i rifiuti, cosicché l'intera zona risulta particolarmente calma, pulita ed efficiente.
Nella zona di stoccaggio, i robot posizionano i bin direttamente uno sopra l'altro in una griglia di alluminio autoportante. La griglia non è usata solo per guidare i contenitori, ma serve anche come rotaia per i robot. A differenza dei precedenti casi studiati, la griglia non è a livello terra ma posizionata a circa 6 metri di altezza.

I robot AutoStore funzionano sempre alcuni ordini in anticipo rispetto ai dipendenti al fine di garantire un flusso costante di bin nei punti di I/O. La soluzione quindi include un carosello di raccolta in prossimità di ogni porto, raggiungendo così un elevato rendimento. Questi caroselli hanno tre bracci rotanti in grado di trasportare tre bin simultaneamente per fornire costantemente bin agli operatori.

| **Autostore** | |
|---|---|
| Dimensioni griglia | 48.8 x 29 x 6.8 |
| Numero di robot | 140 |
| Numero di bin | 44860 |
| Numero porte I/O | 10 |
| Dimensioni bin | 600 x 400 x 330 [mm] |
| **Velocità** | |
| Movimento orizzontale | 3 [m/s] |
| Movimento verticale | 1,6 [m/s] |
| Movimentazione oraria | 335 [bin/(h*stazione I/O)] |

***Tab. 5.5.*** *Dati del caso reale ASDA.*

Con dieci stazioni di prelievo ergonomiche, in cui gli ordini sono completati per la consegna ai vari negozi, il sito è in grado di elaborare una grande quantità di operazioni. Ogni postazione ha un computer touch-screen per la gestione di ordini particolari o eventuali resi.

| **Dato** | | | **T1** | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| **J** | 66 | [bin] | I/O sx | 15,224 | [s] |
| **C** | 55 | [bin] | I/O centro | 10,472 | [s] |
| **N** | 18 | [bin] | I/0 distribuito | 12,056 | [s] |
| | | | | | |
| **lc** | 0,72 | [m] | **T3** | | |
| **wc** | 0,52 | [m] | | | |
| **hc** | 0,34 | [m] | I/O sx | 21,334 | [s] |
| | | | I/O centro | 16,592 | [s] |
| **L** | 48 | [m] | I/0 distribuito | 18,176 | [s] |
| **W** | 29 | [m] | | | |
| **H** | 6,4 | [m] | **T2** | 33,408 | [s] |
| | | | | | |
| **v** | 2,5 | [m/s] | **Tempo Medio** | | |
| **vz** | 1 | [m/s] | | | |
| | | | I/O sx | 69,976 | [s] |
| **tl** | 48 | [s] | I/O centro | 60,472 | [s] |
| **tw** | 11,6 | [s] | I/0 distribuito | 63,640 | [s] |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **th** | 6,4 | [s] | | | |
| | | | **Tm(cc)** | | |
| **Xp1** | 9,60 | [m] | | | |
| **Yp1** | 19,33 | [m] | Tm(cc)1 | 23,813 | [s] |
| **Xp2** | 32,00 | [m] | Tm(cc)2 | 14,373 | [s] |
| **Yp2** | 5,80 | [m] | Tm(cc)3 | 54,648 | [s] |
| | | | | | |
| | | | Tm(cc) | 92,835 | [s] |
| | | | | | |
| | | | **PR** | 65340 | [bin] |
| | | | **PMrobot** | 23,764 | [bin/h] |
| | | | | | |
| | | | **PMmag** | 3350 | [bin/h] |
| | | | | | |
| | | | **Nrobot** | 141 | [robot] |

***Tab. 5.6****. Risultati ottenuti applicando le formule presentate nel terzo capitolo.*

### 5.1.4 Competec Logistik

Swiss Competec Group è una delle principali società di e-commerce e trading informatico specializzata nell'importazione, distribuzione e vendita di hardware, software ed elettronica di consumo. Offrendo a catalogo una vasta varietà di informatica ed elettronica, che include tutto, dagli accessori per PC e software, smartphone e fotocamere digitali – coprendo più di 40.000 prodotti di oltre 700 produttori - l'azienda vende ogni anno a 150000 clienti, privati e aziende, e a 6.000 distributori.

I prodotti sono venduti sia direttamente nel centro di distribuzione, che funge anche da showroom, Competec, sul sito web, via telefono, e-mail e social media. Il rivenditore online sta espandendo continuamente sia la gamma di prodotti disponibili che il volume degli ordini e ciò ha portato ad uno stoccaggio ed evasione degli ordini piuttosto difficile e discontinuo. In poche parole lo spazio e le tecnologie a disposizione non erano più sufficienti.

Il conseguente passo del Competec Group è stato quello di acquistare, nel 2011, un impianto di distribuzione di 55.000 metri quadrati a Willisau, Svizzera, dove previse di consolidare le quattro sedi di distribuzione in una sola sede operazionale centrale. Per quanto riguarda il magazzino automatizzato, Competec ha scelto la soluzione di AutoStore implementata da Swisslog.

Nella sede precedente Competec aveva usato principalmente una soluzione di adempimento degli ordini paperbased, sostenuta da una piccola capacità di stoccaggio parti automatizzati, la movimentazione dei contenitori avveniva su carrelli, con automazione minimamente di sostegno solo in alcune zone. Con la costante crescita delle vendite, del 20% l'anno, assieme al continuo

aumento delle UdC, ha sostanzialmente occupato tutto lo spazio, creando ostacoli sempre più complessi e intricati alla logistica. Da qui la decisione di implementare un magazzino AutoStore con soluzione Click & Pick®, come quello delle poste svizzere, per combinare l'alta velocità di esecuzione degli ordini con un innovativo sistema di inventario. Lavorando nell'e-commerce, dove l'imprevedibilità è un fattore costante, la flessibilità nella catena di approvvigionamento diventa critica. La flessibilità può essere ottenuta grazie al giusto grado di automazione per supportare la fluidità necessaria. L'area di stoccaggio totale è sufficientemente ampia da poter ospitare 86.000 sedi per bin, per la memorizzazione ad alta densità di UdC. Inizialmente i bin utilizzati furono 60.000 ed una volta raggiunto il regime di funzionamento ottimale sono stati aggiunti gli altri, rendendolo il secondo più grande magazzino AutoStore europeo. Novanta sono i robot utilizzati per il trasporto dei contenitori, fornendo così i prodotti in modo rapido ed efficiente alle 15 porte di input/output che fungono anche da stazioni di pick-and-pack.
Grazie alla scalabilità della soluzione Click & Pick®, il Competec Group può estendere il magazzino in funzione della crescita dell'attività di e-commerce.

| **Autostore** | |
|---|---|
| Dimensioni griglia | 24 livelli |
| Numero di robot | 90 |
| Numero di bin | 86000 |
| Numero porte I/O | 25 |
| Dimensioni bin | 600 x 400 x 330 [mm] |
| **Velocità** | |
| Movimento orizzontale | 3 [m/s] |
| Movimento verticale | 1,6 [m/s] |
| Movimentazione oraria | 2000 [bin/h] |

***Tab. 5.7.*** *Dati del caso reale Competec.*

Attualmente la struttura evade tra i 4000 e 6000 ordini al giorno, ciascuno comprendente in media 2-3 prodotti. I clienti inoltre si aspettano la consegna entro 24 ore, quindi il focus è sul farlo bene la prima volta, infatti in caso di clienti scontenti, e quindi di resi, si troverebbero ad affrontare costi aggiuntivi. Questo è uno dei motivi per cui necessitano di un sistema che lavori 24 ore su 24.
Gli operatori di Competec evadono più ordini simultaneamente, raccogliendo la quantità necessaria di oggetti dal bin presentato, poi mette i prodotti nell'ordine corretto nelle varie scatole con l'assistenza della funzionalità pick-to-light. La soluzione offre quindi a Competec un incredibile livello di accuratezza lasciando un il margine che rasenta lo zero ad errori nella evasione degli

ordini, oltre a fornire stazioni di lavoro ergonomiche per gli addetti.
Dopo l'installazione di AutoStore, Swisslog installato oltre 600 metri lineari di QuickMove per trasportare le merci e facilitare la rapida circolazione dei prodotti in tutto il DC. Il QuickMove è progettato modularmente, ed è un nastro trasportatori leggero con sofisticati controlli di posizione, che permette la movimentazione fino a 2.000 contenitori per ora con elevata efficienza tra le stazioni di prelievo, imballaggio e spedizione. QuickMove si basa su una serie di elementi standard e moduli, e fornisce movimentazione affidabile i contenitori di plastica utilizzati da Competec che arrivano a pesare 25 – 30 kg una volta riempiti. La tecnologia di trasporto fornisce controlli integrati, un flusso di dati continuo al sistema di gestione, e un basso consumo di energia elettrica.

| **Dato** | | | **T1** | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| **J** | 55 | [bin] | I/O sx | 13,664 | [s] |
| **C** | 71 | [bin] | I/O centro | 10,129 | [s] |
| **N** | 22 | [bin] | I/0 distribuito | 11,307 | [s] |
| | | | | | |
| **lc** | 0,72 | [m] | **T3** | | |
| **wc** | 0,52 | [m] | | | |
| **hc** | 0,36 | [m] | I/O sx | 19,321 | [s] |
| | | | I/O centro | 15,785 | [s] |
| **L** | 40 | [m] | I/0 distribuito | 16,964 | [s] |
| **W** | 37 | [m] | | | |
| **H** | 8 | [m] | **T2** | 40,464 | [s] |
| | | | | | |
| **v** | 2,8 | [m/s] | **Tempo Medio** | | |
| **vz** | 1,4 | [m/s] | | | |
| | | | I/O sx | 73,450 | [s] |
| **tl** | 28,571 | [s] | I/O centro | 66,379 | [s] |
| **tw** | 13,214 | [s] | I/0 distribuito | 68,736 | [s] |
| **th** | 5,714 | [s] | | | |
| | | | **Tm(cc)** | | |
| **Xp1** | 8,00 | [m] | | | |
| **Yp1** | 24,67 | [m] | Tm(cc)1 | 22,981 | [s] |
| **Xp2** | 26,67 | [m] | Tm(cc)2 | 12,833 | [s] |
| **Yp2** | 7,40 | [m] | Tm(cc)3 | 58,288 | [s] |
| | | | | | |
| | | | Tm(cc) | 94,102 | [s] |
| | | | | | |
| | | | **PR** | 85910 | [bin] |
| | | | **PMrobot** | 22,294 | [bin/h] |
| | | | | | |
| | | | **PMmag** | 2000 | [bin/h] |
| | | | | | |
| | | | **Nrobot** | 90 | [robot] |

***Tab. 5.8.*** *Risultati ottenuti applicando le formule presentate nel terzo capitolo.*

### 5.1.5 Riepilogo

Innanzitutto è utile ricordare tutte le approssimazioni e le assunzioni che sono state necessarie lungo il percorso di modellazione matematica, alcune per semplicità di calcolo, come il non considerare le fasi di accelerazione e decelerazione, e la politica di allocazione random; altre per utilizzare formule già verificate e suggerite dalle norme, come assumere il punto di I/O nell'angolo a sinistra della griglia superiore per utilizzare le norme F.E.M.; altre ancora perché non si conosce esattamente come funzioni la logica di controllo dei robot, in questo caso ci si riferisce ai movimenti per movimentare i bin presenti sopra quello richiesto, agli eventuali rimescolamenti e al tempo necessario per la ricarica dei robot. Nonostante queste imprecisioni e nonostante non si conoscano esattamente le dimensioni delle griglie dei sistemi reali i risultati ottenuti, per quanto riguarda in numero dei robot necessari è piuttosto rassicurante. Per quanto riguarda il tempo medio per un ciclo combinato sarà verificato nella sezione successiva, mediante il metodo Monte Carlo in quanto, purtroppo, non sono disponibili informazioni relative ai casi reali.

Nella tabella successiva sono presentati i dati relativi al numero di robot effettivamente utilizzati e al numero di robot che risulta dalle formule presentate.
Con DMA si indica la deviazione media assoluta, con DMR la deviazione media relativa e V la varianza che indica la variabilità dei dati.

| | **Nrobot,reale** | **Nrobot** | **Differenza %** |
|---|---|---|---|
| **YellowCube** | 35 | 31 | 11,42% |
| **Antalis** | 10 | 9 | 10,00% |
| **ASDA, Uk** | 140 | 141 | -0,71% |
| **Competec Logistik** | 90 | 90 | 0% |
| | | | |
| **DMA** | 1,5 robot | | |
| **DMR** | 0,13 | | |
| **V** | 4,5 robot² | | |

***Tab. 5.9.*** *Dati valutativi delle formule applicate.*

Come si può facilmente notare, a parte per il caso YellowCube, i dati danno un feedback piuttosto positivo, rassicurando sulla validità delle formule proposte.
Studiando i dati si può analizzare come l'influenza della posizione del punto, o dei punti, di I/O sul tempo di prelievo. La posizione modifica solamente il tempo necessario per la traslazione dal punto di I/O alla colonna selezionata e ritorno, quindi influenza i movimenti a più basso impatto sul tempo

totale. In base alla forma in pianta della scaffalatura, passando da un I/O posizionato nell'angolo in basso a sinistra ad uno centrato nel fronte, si può risparmiare, nei casi analizzati, fino al 13,6% nel caso del ASDA, mentre il guadagno minimo è circa del 7% per Antalis (si parla del solo tempo di recupero di un bin). Per quanto riguarda il punto di I/O distribuito nel fronte di hanno dei guadagni variabili tra il 5% e il 10%. Si sottolinea che il guadagno dipende sia dalla forma che dalla dimensione della pianta del sistema. In caso di I/O multipli si può pensare di suddividere l'area di base in aree di competenza per ogni baia, e pesare il tempo in base alla dimensione dell'area stessa. Comunque influenza solamente i tempi a minor impatto.

Modificando i dati per analizzarne l'influenza sul $Tm_{(cc)}$ e di conseguenza sul numero di robot, si è notato che i parametri più importanti sono il numero di livelli e la velocità di traslazione verticale. Ad esempio, nel caso Competec, ipotizzando 24 livelli invece che 22 il numero di robot necessari passa da 90 a 102, mentre aumentando di due bin sia la dimensione lungo x (da 55 a 57) che lungo y (da 71 a 73) il numero di robot richiesti per la potenzialità di movimentazione aumenta solo di uno. Analoghi risultati si ottengono modificando il numero di livelli negli altri casi, come per esempio ASDA dove con 18 livelli servono 141 robot, con 19 ne servono 152, con 20 i robot richiesti salgono a 162. Mentre modificando le dimensioni della in pianta sempre di due bin per direzioni la richiesta di robot aumenta solamente di una unità.

Da questi dati si può già intuire l'importanza della velocità verticale. Modificandola anche di poco la richiesta di robot può variare sensibilmente. E' quindi necessario in sede di progetto valutare attentamente che velocità assumere, considerando anche le fasi di accelerazione, decelerazione e il peso dei contenitori. Per far capire l'influenza della velocità verticale basti pensare che imponendo un velocità media di 1,2 m/s rispetto a 1 nel caso ASDA si passa da 141 a 128 robot richiesti, che scendono a 113 ipotizzando che i bin vengano spostati sempre alla massima velocità verticale di 1,6 m/s, senza considerare fasi di accelerazione, frenata e il peso dei bin. Per quanto riguarda la velocità orizzontale passando da 2,5 a 2,7 m/s i robot necessari sarebbero 136, che scendono a 130 per la velocità massima raggiungibile di 3 m/s.

Si capisce quindi l'importanza delle dimensioni verticali del sistema per la loro enorme influenza sui tempi di funzionamento.

Per meglio rendere l'idea si propongono dei grafici in cui si analizza l'andamento del tempo medio, e di conseguenza del numero di robot necessari, in funzione di un specifico parametro. L'idea è quella di mantenere invariati tutti i parametri tranne uno, che varierà tra un minimo e un massimo, per valutare il peso dello stesso in ambito di progettazione.

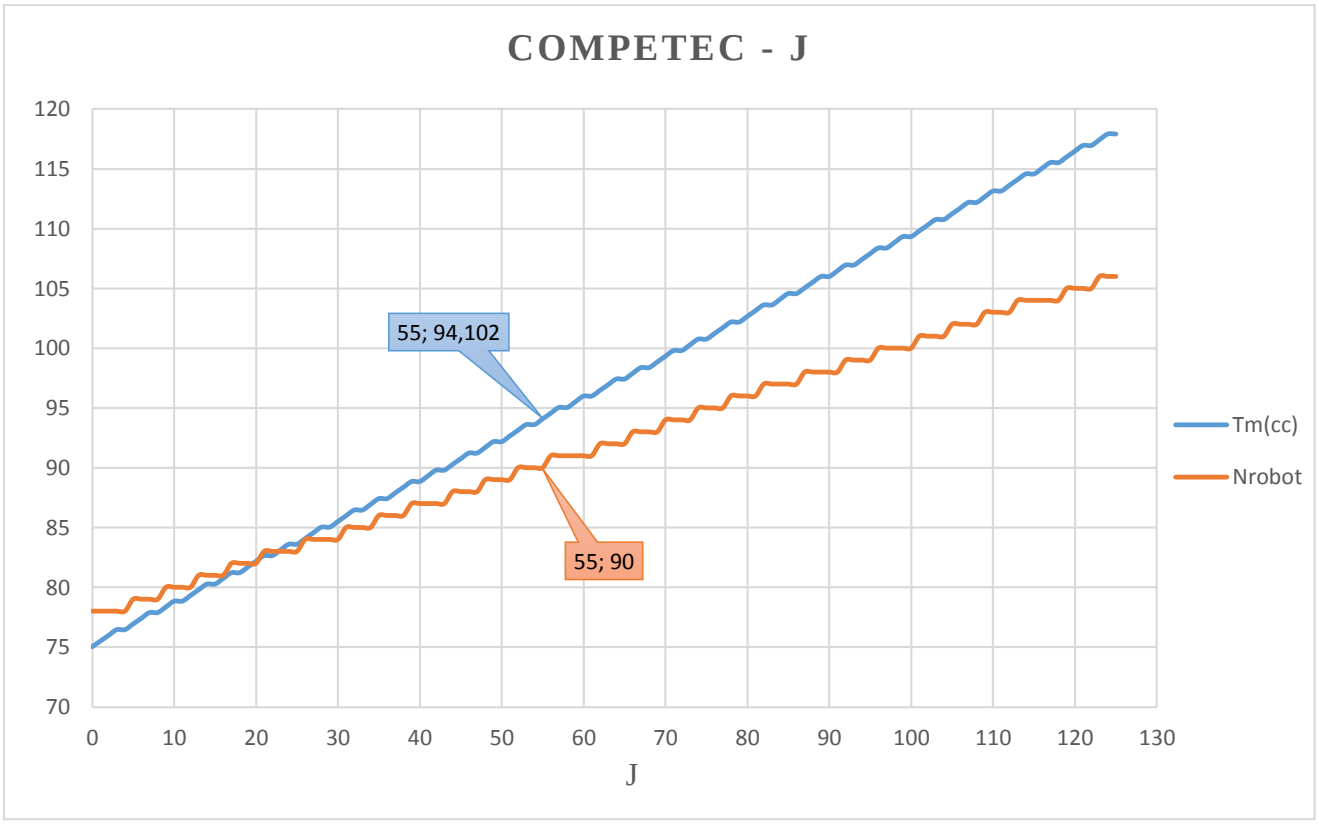


***Grafico 5.1.*** *Andamento del tempo medio per un ciclo combinato in funzione del numero di bin in direzione x.*

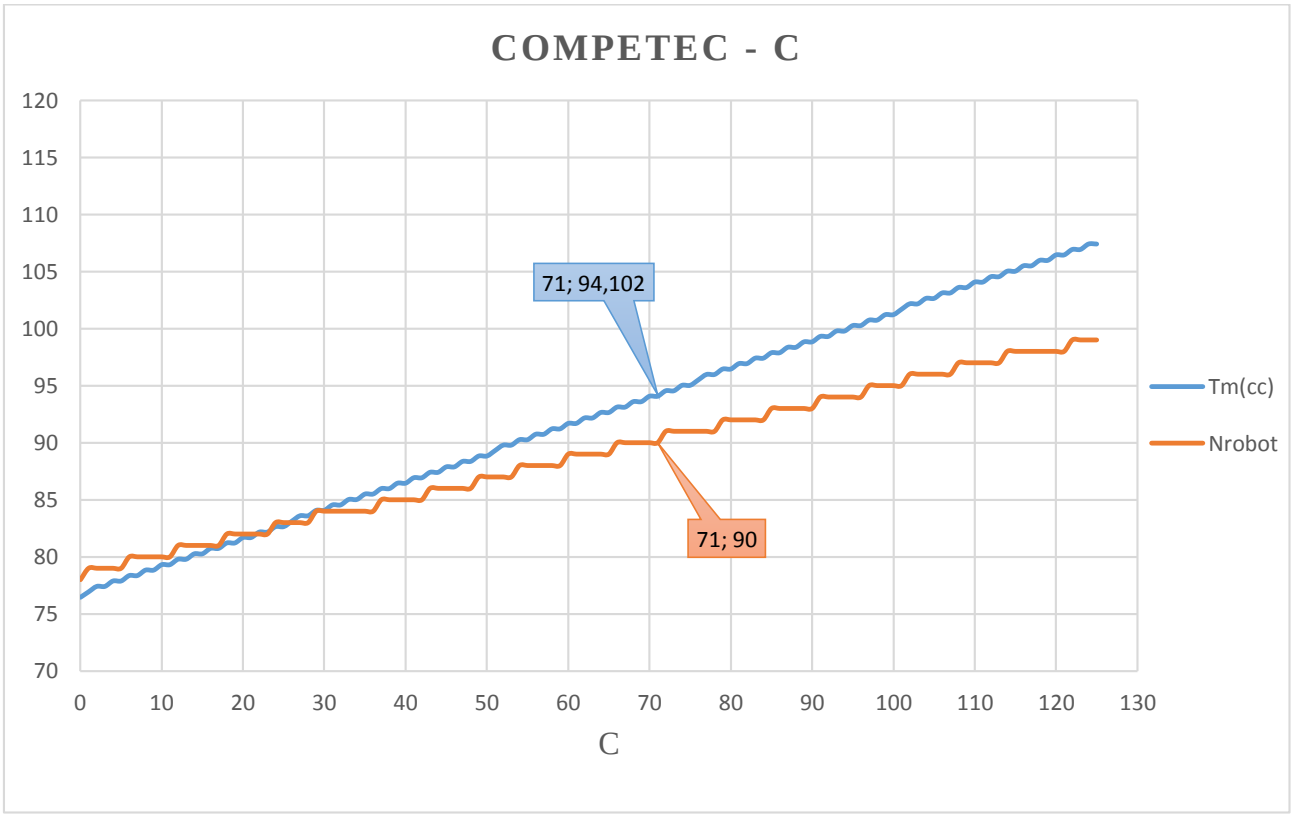


***Grafico 5.2.*** *Andamento del tempo medio per un ciclo combinato in funzione del numero di bin in direzione y.*

Il caso studio utilizzato come punto di partenza per tale analisi è il magazzino Competec. Il primo grafico rappresenta l'andamento del tempo medio e del numero di robot al variare di J, mentre nel secondo il parametro variabile è C. Si può subito notare come gli andamenti siano similari e quello del tempo medio, in blu, si avvicini ad una retta spezzata, mentre il numero di robot salga a gradini. La pendenza è piuttosto lieve, anche se nel caso Competec-J è leggermente maggiore, e questo è dovuto al fatto che la dimensione del singolo bin è maggiore in dimensione *x* che in direzione *y*. Per avere un riferimento, in ogni grafico, è indicato il valore del magazzino reale.
Il passo successivo è quello di analizzare l'influenza del numero di livelli. Anche se il massimo numero di bin impilabili è 24 (consigliato dal costruttore), per meglio chiarire il comportamento si è studiato un'estensione del magazzino fino a 50 livelli. Dal puto di vista strettamente matematico, la formula del tempo medio per un ciclo combinato in cui il parametro variabile è il numero di livelli N può essere espressa come

$$aN^2 + bN + c = 0$$

quindi ci si aspetta una parabola con punto di minimo sull'asse delle ordinate, relativa al solo tempo di traslazione alla posizione richiesta e ritorno, e pendenza regolata dall'altezza del singolo bin e le velocità di traslazione verticale e orizzontale. Ciò che si ottiene è perfettamente in linea a quello che si era previsto, come si può vedere dal grafico 5.3. Inoltre, rispetto alle rette viste nei grafici 5.1 e 5.2 la parabola ha una pendenza molto maggiore, e ciò significa che all'aumentare del numero di livelli il tempo medio per un ciclo combinato, e dei robot, aumenta molto più velocemente che nei precedenti casi. Questo si poteva già intuire solo pensando al fatto che variando il numero di livelli, cambiano non solo i viaggi in verticale ma anche la quantità di bin da rimescolare e scavare. Da questo si può capire l'importanza di progettare un magazzino con il corretto numero di livelli in base alle necessità.

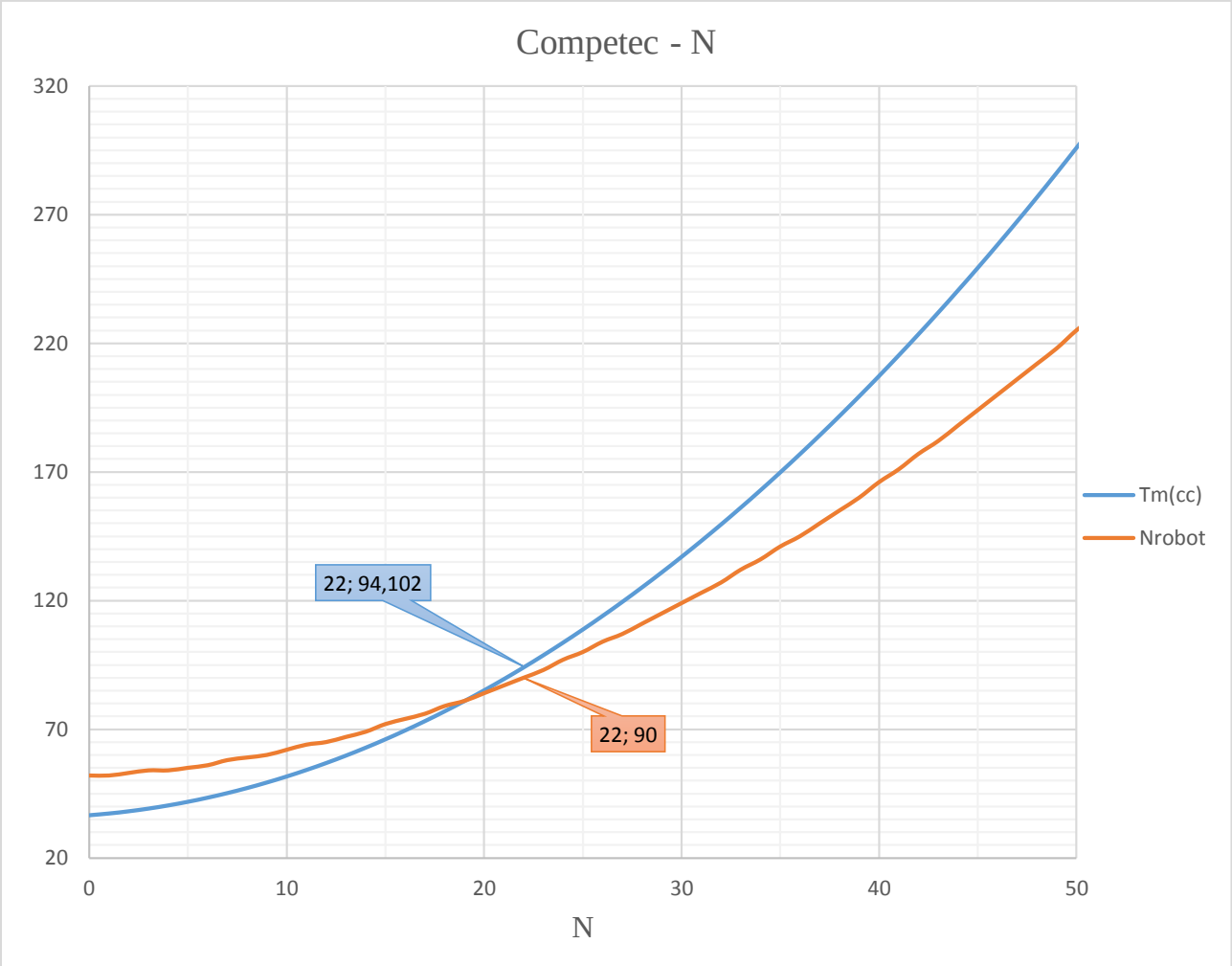


***Grafico 5.3.*** *Andamento del tempo medio per un ciclo combinato in funzione del numero di bin in direzione z.*

Gli ultimi parametri che si andranno ad analizzare sono le velocità orizzontale e verticale. E' facilmente immaginabile come impostare una velocità più o meno elevata per i movimenti comporta un tempo ciclo più o meno elevato. Analizzando la già citata formula del tempo medio per un ciclo combinato si può vedere che l'andamento delle curve in funzione delle velocità saranno due iperboli (1/v, 1/vz), che si differenzieranno per pendenza e posizione del punto di cambio pendenza.

Il grafico 5.4 rappresenta l'andamento di Tm(cc) al variare di *v* e *vz*. Come già si era intuito solo provando a modificare i dati reali, l'iperbole funzione della velocità verticale presenta una pendenza maggiore prima del cambio di pendenza e minore poi. Unendo a questa considerazione il fatto che il valore della velocità verticale reale si trovi spesso più vicino al punto di cambio pendenza, rispetto alla reale velocità orizzontale che si trova in un punto a pendenza più bassa, si spiega il perché rallentando verticalmente i robot si alza notevolmente il numero degli stessi e se si abbassa la

richiesta cambia di poco, mentre se si modifica quella orizzontale il numero di robot varia in modo più omogeneo.

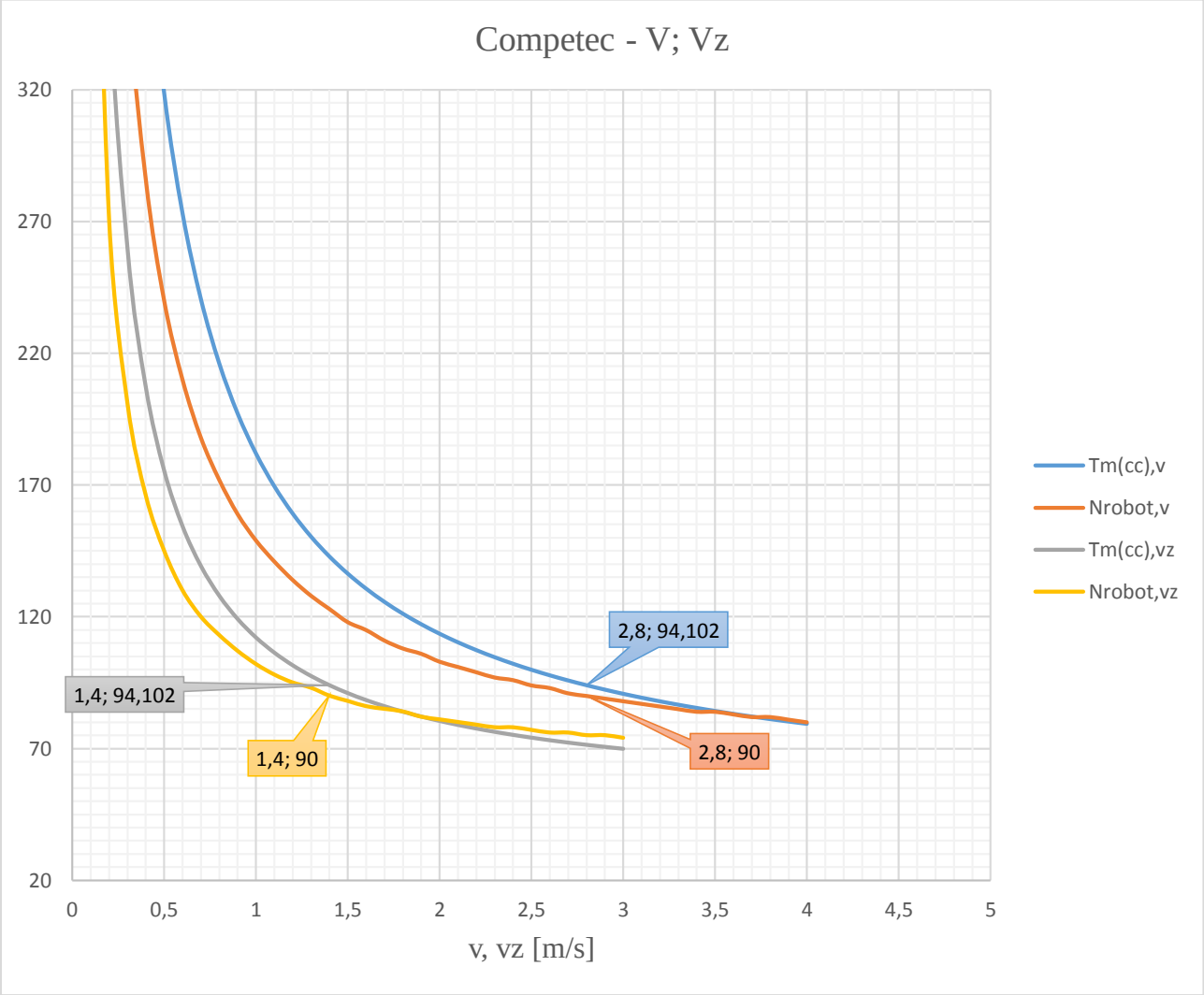


***Grafico 5.4.*** *Andamento del tempo medio per un ciclo combinato in funzione delle velocità v e vz.*

Concludendo si può confermare ciò che si era già accennato precedentemente, ovvero che le dimensioni verticali (*N* e *vz*) incidono in maniera più pesante su tempi e numero di robot e di conseguenza saranno le variabili da ottimizzare in sede di progetto.

Un'ultima analisi che si può eseguire è l'influenza della posizione e del numero di punti di input/output sui tempi di movimentazione. Si specifica che si modifica solo il tempo necessario per raggiungere la posizione richiesta e per tornare al punto di I/O, quindi, come dimostrato prima, non influisce molto sul numero di robot. Si prende come punto di riferimento il punto di I/O posizionato nell'angolo in basso a sinistra, in quanto è la disposizione utilizzata dalle norme F.E.M.
Riportiamo le equazioni 3.5,6,7 per poter meglio capire il grafico 5.5:

- Per il punto di I/O posizionato nel punto in basso a sinistra della griglia superficiale:

$$T_1 = \frac{J}{2} * \frac{l_c}{v} + \frac{C}{2} * \frac{w_c}{v} \quad \text{(eqz. 3.5)}$$

- Per il punto di I/O posizionato al centro del fronte:

$$T_1 = \frac{J}{4} * \frac{l_c}{v} + \frac{C}{2} * \frac{w_c}{v} \quad \text{(eqz. 3.6)}$$

- Per il punto di I/O uniformemente distribuito nel fronte:

$$T_1 = \frac{J}{3} * \frac{l_c}{v} + \frac{C}{2} * \frac{w_c}{v} \quad \text{(eqz. 3.7)}$$

In più si ricorda che nel caso di punti di I/O posizionati su più lati del cubo, per calcolare $T_1$, si suddivide la griglia superficiale in aree di competenza, per ognuna si calcola il tempo di movimentazione e si ricava il $T_1$ cercato mediando i tempi pesandoli sull'area di competenza.

| **Posizione e numero I/O** | **Tm [s]** | **%** |
|---|---|---|
| I/O sx | 73,450 | 0,00 |
| I/O centro | 66,379 | -9,63 |
| I/O distribuito | 68,736 | -6,42 |
| I/O, uno per lato lungo C | 62,842 | -14,44 |
| I/O, uno per lato lungo J | 59,875 | -18,48 |
| I/O, uno per lato | 59,875 | -18,48 |
| I/O, due per lato lungo C | 56,250 | -23,42 |
| I/O, due per lato lungo J | 56,250 | -23,42 |

***Tab. 5.10.*** *Tempo medio per il recupero di un bin e differenze percentuale rispetto alla configurazione che prevede l'I/O in basso a sinistra.*

In tabella 5.10 sono rappresentati i tempi medi per il recupero di un bin con le varie configurazioni. Da sottolineare il fatto che le differenze che sembrano piuttosto marcate, non fanno riferimento al tempo medio per un ciclo combinato, e nemmeno al tempo utilizzato nel calcolo della potenzialità di movimentazione, ma al semplice tempo medio di recupero per un singolo bin. Questo significa che non è considerato il tempo necessario al riposizionamento dei bin movimentati ma non richiesti, e non è considerato il livello di servizio. Inoltre aumentando il numero di punti di I/O non si possono più considerare solo viaggi a ciclo combinato, ma anche una buona parte di viaggi a ciclo semplice, e potrebbero ridursi il numero di "aiuti" tra robot. Ci potrebbero anche essere problemi di traffico e/o invasione limitando i robot in una piccola area, e la stessa area di ridotte dimensioni comporterebbe molti cambi di direzione con conseguenti accelerazioni e decelerazioni continue, con relativi consumi maggiori e riduzione della velocità media. Nel grafico 5.5 viene rappresentata la tabella 5.10 in un istogramma.

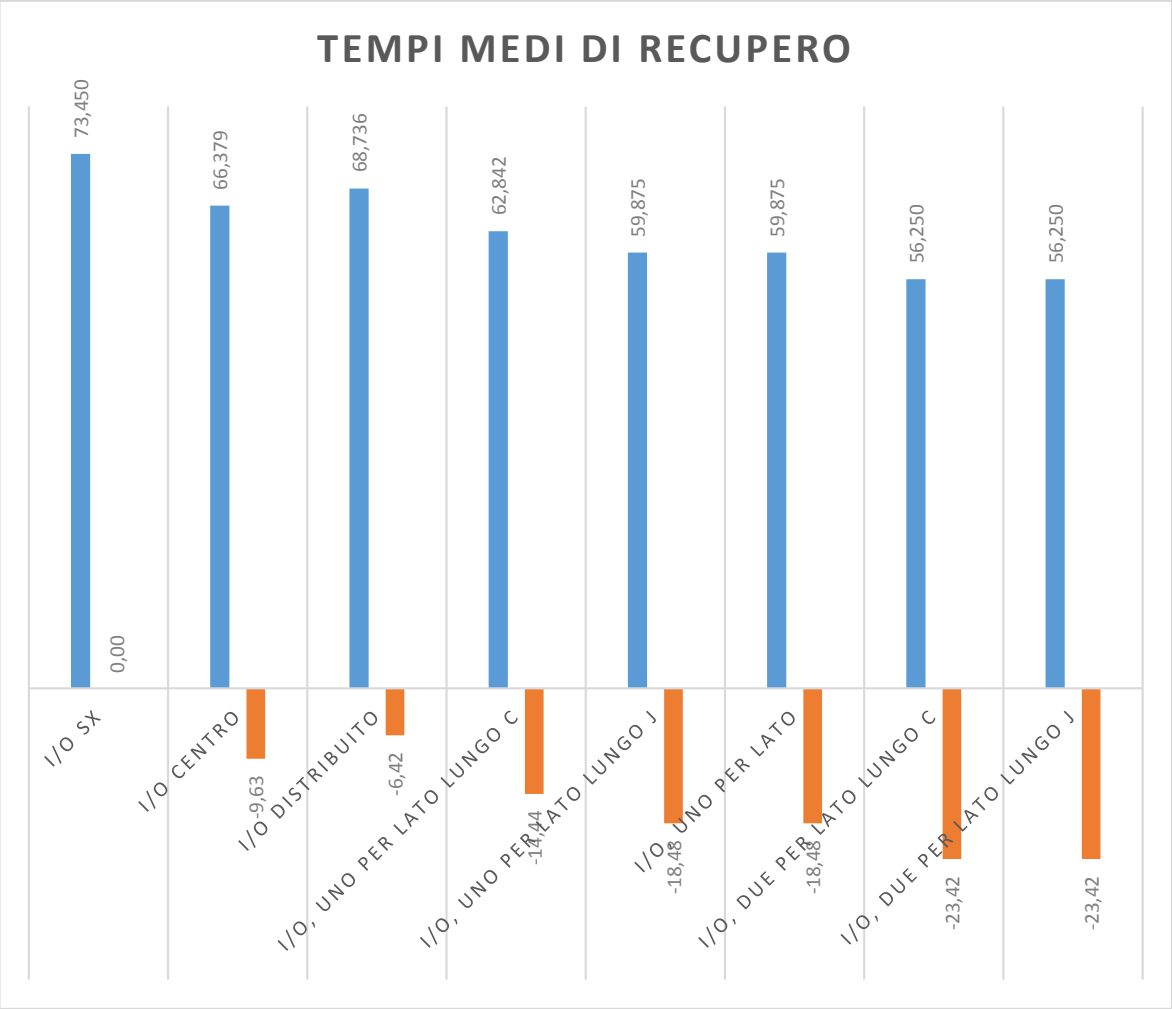


***Grafico 5.5.*** *Rappresentazione delle differenze del tempo medio di recupero in base alla configurazione dei punti di I/O.*

## 5.2 Simulazione Monte Carlo

Il Metodo Monte Carlo fa parte della famiglia dei metodi statistici non parametrici. È utile per superare i problemi computazionali legati ai test esatti (ad esempio i metodi basati sulla distribuzione binomiale e calcolo combinatorio, che per grandi campioni generano un numero di permutazioni eccessivo).

Il metodo è usato per trarre stime attraverso simulazioni. Si basa su un algoritmo che genera una serie di numeri tra loro incorrelati, che seguono la distribuzione di probabilità che si suppone abbia il fenomeno da indagare. L'incorrelazione tra i numeri è assicurata da un test chi quadrato.

La simulazione Monte Carlo calcola una serie di realizzazioni possibili del fenomeno in esame, con il peso proprio della probabilità di tale evenienza, cercando di esplorare in modo denso tutto lo spazio dei parametri del fenomeno. Una volta calcolato questo campione casuale, la simulazione esegue delle 'misure' delle grandezze di interesse su tale campione. La simulazione Monte Carlo è ben eseguita se il valore medio di queste misure sulle realizzazioni del sistema converge al valore

vero.

Nel caso in esame il metodo Monte Carlo viene utilizzato per verificare l'attendibilità della formula del tempo di ciclo combinato medio. Sono state effettuate 10.000 simulazioni per ogni caso reale, con confronto successivo dei dati. La formula utilizzata per simulare il comportamento di un sistema AutoStore è la seguente:

$$T_{(cc)MC} = \frac{N * h_c}{v_z} + \frac{J_1 * l_c}{v} + \frac{C_1 * w_c}{v} + 2 * \frac{N_1 * h_c}{v_z} + |J_2 - J_1| * \frac{l_c}{v} + |C_2 - C_1| * \frac{w_c}{v} + \frac{N_2 * (N_2 - 1)}{2} * \left(\frac{w_c + l_c}{2 * v} + 2 * \frac{h_c}{v_z}\right) + \frac{J_2 * l_c}{v} + \frac{C_2 * w_c}{v} + \frac{N * h_c}{v_z}$$

(eqz. 5.2)

dove la terna ($J_1$, $C_1$, $N_1$) indica la locazione di deposito del bin prelevato dalla postazione di I/O mentre ($J_2$, $C_2$, $N_2$) è la posizione del contenitore da prelevare. Quindi:

- $\frac{N+h_c}{v_z} + \frac{J_1*l_c}{v} + \frac{C_1*w_c}{v} + 2 * \frac{N_1*h_c}{v_z}$ è il tempo necessario per recuperare il bin dalla posizione di I/O, raggiungere la colonna prescelta per il deposito (J1, C1), raggiungere il livello di stoccaggio (N1) e tornare al livello della griglia superiore:
- $|J_2 - J_1| * \frac{l_c}{v} + |C_2 - C_1| * \frac{w_c}{v}$ rappresenta il tempo necessario per la traslazione dalla colonna 1 alla colonna 2 da dove sarà prelevato il contenitore con le merci richieste;
- $\frac{N_2*(N_2-1)}{2} * \left(\frac{w_c+l_c}{2*v} + 2 * \frac{h_c}{v_z}\right)$ è il tempo necessario per la movimentazione dei bin impilati sopra quello richiesto e il recupero dello stesso;
- $\frac{J_2*l_c}{v} + \frac{C_2*w_c}{v} + \frac{N+h_c}{v_z}$ rappresenta il tempo che serve al robot per tornare dalla colonna 2 al punto di I/O e consegna del bin.

J1, J2, C1, C2, N1, N2 sono, in ogni simulazione, generati casualmente e in modo incorrelato tra loro e incorrelato all'evento precedente. La formula è impostata in modo tale che i dati a generazione casuale siano numeri interi positivi, semplificando così la procedura di simulazione. Una volta simulati 10.000 viaggi doppi si calcola la media e poi si confronta con il risultato ottenuto con la formula mediata.

| | **T(cc)MC [s]** | **Tm(cc) [s]** | **Differenza %** |
|---|---|---|---|
| **YellowCube** | 102,34 | 90,09 | 11,969 |
| **Antalis** | 87,35 | 76,47 | 12,455 |
| **ASDA, Uk** | 102,27 | 92,83 | 9,230 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Competec Logistik** | 106,21 | 94,10 | 11,401 |
| | | | |
| **MADj** | 11,17 [s] | | |
| **MRDj** | 11,264 % | | |
| **Dj** | 126,05 [s²] | | |

***Tab.5.11****. Confronto tra i dati ottenuti con la formula media e quelli ottenuti con la simulazione Monte Carlo per quanto riguarda i casi reali.*

Quattro casi però non sono statisticamente significativi, quindi sono stati creati 100 scenari immaginari per poter confrontare più approfonditamente la formula mediata e la simulazione. Per ogni nuova configurazione di magazzino è stato calcolato il tempo medio e sono state eseguite le 10.000 simulazioni come per i casi reali. I dati ottenuti sono presentati nella tabella qui sotto.

| | **MAD [s]** | **MRD %** | **D [s²]** |
|---|---|---|---|
| **100 scenari** | 9,975 | 9,539 | 109,459 |

***Tab.5.12.*** *Risultati ottenuti confrontando i dati di 100 scenari.*

Come già per il quarto capitolo la deviazione media assoluta (MAD) è definita come la media delle differenze assolute tra i valori stimati dal modello e i valori ottenuti con la simulazione Monte Carlo. La deviazione relativa media (MRD) confronta la differenza tra i valori stimati e i valori ottenuti con la simulazione Monte Carlo, e rappresenta la percentuale di errore del modello. L'ultima funzione di valutazione è la deviazione che è la misura della variabilità o dispersione. Le seguenti funzioni vengono utilizzate per calcolare l'affidabilità del modello:

$$MAD_j = \sum_i \frac{\left|T_{(cc)_{i,MC}} - T_{(cc)_{i,}}\right|}{n} \qquad \text{(eqz. 5.3)}$$

$$MRD_j = \frac{1}{n} * \sum_i \frac{\left|T_{(cc)_{i,MC}} - T_{(cc)_{i,}}\right|}{T_{(cc)_{i,MC}}} \qquad \text{(eqz. 5.4)}$$

$$D_j = \sum_i \frac{\left|T_{(cc)_{i,MC}} - T_{(cc)_{i,}}\right|^2}{n} \qquad \text{(eqz. 5.5)}$$

## 5.3 Confronto tra AutoStore e Tornado Miniload

Dopo aver sviscerato comportamento, vantaggi, svantaggi e modello matematico del sistema AutoStore, risulta interessante confrontarlo con altri tipi di sistemi automatici per contenitori. L'ideale è confrontare il magazzino AutoStore con il Tornado Miniload così da confrontare sistemi che movimentano gli stessi tipi di bin.
A partire dalle prime e evidenti differenze si andrà ad analizzare i due sistemi mediante gli indici di

caratterizzazione dei magazzini, la potenzialità di movimentazione oraria e la potenzialità di ricezione.
Innanzitutto ricordiamo che sono entrambi magazzini automatizzati, ma mentre AutoStore è un magazzino 3D che utilizza robot per la movimentazione, Tornado Miniload è un sistema AS/RS con navette e gru caratterizzato dalla possibilità di portare due contenitori contemporaneamente (dual-shuttle) invece che la classica navetta singola.
La principale caratteristica di AutoStore è l'essere un magazzino 3D senza navate, il che permette di aumentare sensibilmente la densità di stoccaggio, con riflessi negativi sulla selettività, infatti i contenitori non sono direttamente accessibili, e più livelli presenta più difficile risulta raggiungere gli ultimi bin. Il sistema Tornado invece presenta una densità di stoccaggio sicuramente minore, anche per lasciare lo spazio necessario alla movimentazione delle navette, ma una selettività maggiore. Quindi, introducendo:

- Indice di selettività: $S = \frac{M_u}{M_t}$ , definito come il rapporto tra i movimenti utili e i movimenti necessari per recuperare una unità di carico. E' uno dei principali elementi di costo per un magazzino.
- Indice di saturazione superficiale: $I_s = \frac{A_u}{A_t}$ , è l'area effettivamente utilizzata rapportata alla superficie totale occupata dal sistema;
- Indice di saturazione volumetrica: $I_v = \frac{V_u}{V_t}$ , è il volume di stoccaggio effettivo in rapporto al volume totale del magazzino;

si può dire che l'indice di selettività sia decisamente maggiore, ed uguale a uno, nel caso di scaffali a singola profondità, per il sistema Tornado, mentre esso si abbassa notevolmente con il numero di livelli del sistema AutoStore. Per quanto riguarda la saturazione superficiale e volumetrica il magazzino 3D è un passo avanti rispetto al sistema AS/RS grazie allo spazio risparmiato per le navate. C'è da notare che potendo sviluppare in verticale il magazzino, sopra o sotto il livello terra, si potrebbe arriva a stoccare più UdC/m² nel sistema Tornado rispetto all'AutoStore. Dal punto di vista economico, in fase di progetto, ci si trova di fronte un trade-off ed è necessario decidere se puntare sul risparmio dovuto al minor spazio richiesto, particolarmente importante nei casi in cui il sistema sia refrigerato, oppure sul minor tempo necessario per il recupero dei bin e minor numero di veicoli automatici necessari.
Ulteriori considerazioni utili riguardano l'adattabilità dei sistemi alle strutture già esistenti, dove si trova in vantaggio il sistema AutoStore grazie alla leggerezza e alla flessibilità, può anche essere soppalcato, però c'è anche da considerare l'altezza consigliata da Swisslog per i due sistemi: 6,8 m

per AutoStore e 20 m (24 per i bin più leggeri) per Tornado, e ciò permette di sfruttare maggiormente, nella direzione dell'altezza, il magazzino, anche scavando e posizionando il punto di I/O ad una altezza diversa dall'angolo in basso a sinistra della scaffalatura.
Si passa ora da queste considerazione a degli esempi numerici per dare l'idea della differenza tra i due tipi di magazzino.

Si prende in considerazione il caso YellowCube, con un volume occupato pari a 40 x 18 x 6,4 m, e si immagina di implementare un sistema Tornado su un spazio identico. Lo spazio disponibile permette di implementare 5 corridoi della lunghezza di 40 m con scaffalature parte per parte per un totale di 16.000 locazioni per bin, rispetto alle 37.000 del sistema 3D, occupando lo stesso volume di stoccaggio. Nella tabella seguente sono presentati i dati ottenuti applicando le formule presentate nel quarto capitolo, mentre i dati sono forniti direttamente dal produttore. Lo scopo è quello di calcolare il tempo medio e la potenzialità di movimentazione del magazzino appena presentato, per confrontarlo con i dati AutoStore. Per calcolare la potenzialità di movimentazione di un singolo miniload si considera il 40% di cicli doppi singoli e il 60% di cicli quadrupli.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Nrobot** | 5 | | T(I/O-P1) | 2,44 | [s] |
| | | | T(P1-P2) | 2,44 | [s] |
| **Sh** | 6,00 | [m/s] | T(P2-I/0) | 4,00 | [s] |
| **Ah** | 4,00 | [m/s²] | T(I/O-P3) | 4,00 | [s] |
| **Sv** | 3,00 | [m/s] | T(P3-P4) | 1,24 | [s] |
| **Av** | 3,00 | [m/s²] | T(P4-I/0) | 4,03 | [s] |
| **altezza** | 6,50 | [m] | T(P2-P3) | 4,03 | [s] |
| **lunghezza** | 40,00 | [m] | T(P3-P4) | 3,72 | [s] |
| | | | | | |
| | x | y | **E(DSC)** | 18,16 | [s] |
| **P1** | 0,20 | 4,33 | **E(QC)** | 16,68 | [s] |
| **P2** | 15,20 | 3,19 | **PR** | 16000 | [bin] |
| **P3** | 40,00 | 5,20 | **PMmini** | 208,45 | [bin/(h*robot)] |
| **P4** | 26,67 | 1,30 | **PMtot** | 1042,24 | [bin/h] |

***Tab. 5.13.*** *Dati di un magazzino Tornado Miniload.*

Impossibile non notare come il tempo medio, sia per un doppio ciclo semplice che per un ciclo quadruplo sia nettamente inferiore rispetto al caso YellowCube, sia per il minor numero di bin presenti, ma soprattutto per la miglior selettività del sistema. Questo porta anche ad una potenzialità di movimentazione nettamente superiore.

Si immagini ora di poter sviluppare fino alla massima altezza il magazzino e controllarne le prestazioni. Esplodendo fino a 20 m l'altezza della scaffalatura è possibile posizionare fino a 62 bin

sovrapposti e con 5 corridoi di 40 m la potenzialità ricettiva risulta di 49.600 bin, rispetto ai 37.000 ottenibili sfruttando al massimo l'altezza di un sistema AutoStore con la stessa pianta.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Nrobot** | 5 | | T(I/O-P1) | 5,44 | [s] |
| | | | T(P1-P2) | 5,44 | [s] |
| **sh** | 6,00 | [m/s] | T(P2-I/0) | 4,00 | [s] |
| **ah** | 4,00 | [m/s²] | T(I/O-P3) | 4,00 | [s] |
| **sv** | 3,00 | [m/s] | T(P3-P4) | 2,18 | [s] |
| **av** | 3,00 | [m/s²] | T(P4-I/0) | 4,03 | [s] |
| **altezza** | 20,00 | [m] | T(P2-P3) | 4,27 | [s] |
| **lunghezza** | 40,00 | [m] | T(P3-P4) | 5,00 | [s] |
| | | | | | |
| | x | y | **E(DSC)** | 25,10 | [s] |
| **P1** | 0,20 | 13,33 | **E(QC)** | 24,19 | [s] |
| **P2** | 15,20 | 9,80 | **PR** | 49600 | [bin] |
| **P3** | 40,00 | 16,00 | **PMmini** | 146,62 | [bin/(h*robot)] |
| **P4** | 26,67 | 4,00 | **PMtot** | 733,10 | [bin/h] |

***Tab. 5.14.*** *Dati di un magazzino Tornado Miniload, sfruttando l'altezza massima.*

Si può subito notare come a seguito dell'aumento dell'altezza vi sia stato una conseguente maggiorazione del tempo medio per i cicli e la potenzialità di movimentazione oraria sia molto simile a quella del magazzino AutoStore con la stessa pianta.

Il passo successivo è confrontare volume e area occupata dai due sistemi per ottenere due magazzini con la stessa capacità di stoccaggio e/o la stessa potenzialità di movimentazione oraria.
Uno dei fattori a cui è necessario fare attenzione è la congestione dei robot nel sistema AutoStore; nel rincorrere le prestazioni nel Tornado si rischia di aumentare il numero di robot in modo esponenziale fino ad arrivare al punto in cui l'eccessivo traffico comporterebbe l'aumento del tempo medio di recupero e non la sua diminuzione.
Si immagini di voler un magazzino la cui struttura possa contenere circa 75.000 bin, per quanto riguarda la potenzialità di movimentazione invece si ipotizzano varie richieste a crescere da 650 a 2500 bin/h. Per quanto riguarda la soluzione AutoStore la configurazione fisica non cambia in base alle diverse richieste di PM, così non è invece per il Tornado miniload crane. Si presentano ora due tabelle rappresentative dei vari casi. La prima, tabella 5.15, raggruppa dimensioni e prestazioni del magazzino AutoStore in base alle vaie richieste. Per quanto riguarda l'altezza si sfrutta la piena potenzialità della griglia, spingendosi fino a 6,4 metri di altezza. Le velocità sono le medesime per ogni esempio e sono 1 m/s per la velocità verticale e 2,5 m/s per la velocità orizzontale.

| **AutoStore** | | | |
|---|---|---|---|
| J = 50 [bin] | l = 0,70 [m] | L = 35 [m] | tl = 38,89 [s] |
| C = 75 [bin] | w = 0,50 [m] | W = 38 [m] | tw = 12,50 [s] |
| N = 20 [bin] | h = 0,32 [m] | H = 6,4 [m] | th = 7,11 [s] |
| PR = 75000 [bin] | A = 1330 [m²] | V = 8512 [m³] | |
| | PMrobot = 13,22 [bin/h] | | Tm(cc) = 141,73 [s] |
| | PM = 650 [bin/h] | → | Nrobot = 49 |
| | PM = 1000 [bin/h] | → | Nrobot = 76 |
| | PM = 1500 [bin/h] | → | Nrobot = 113 |
| | PM = 2000 [bin/h] | → | Nrobot = 151 |
| | PM = 2500 [bin/h] | → | Nrobot = 188 |

***Tab. 5.15.*** *Dati riassuntivi delle dimensioni e delle prestazioni di un sistema AutoStore in varie configurazioni.*

In tabella 5.16 invece vengono descritte le varie configurazioni del sistema Tornado in funzione della PM. La dimensione della singola bancata è di 3,5 metri e comprende 0,7x2 m di spazio per i vani di locazione e 2,1 metri per il doppio miniload, e la dimensione dei vani di locazione dei bin è uguale a quella considerata per il caso AutoStore. Si ipotizza di non avere limiti in altezza per la costruzione del magazzino quindi di potersi spingere fino a 20 metri di scaffalatura (limite per i bin pesanti, fino a 120kg). Per quanto riguarda velocità e accelerazioni sono considerate quelle massime consigliate da Swisslog.

Si ricorda che gli esempi proposti ipotizzano di aver carta bianca per quanto riguarda altezza, larghezza e lunghezza del magazzino. Una fatta questa precisazione si può procedere con il confronto tra le due diverse soluzioni.

Innanzitutto si nota come per una potenzialità di movimentazione richiesta piuttosto bassa, l'area occupata dalle due scaffalature sia piuttosto simile, anche se leggermente inferiore quella occupata da un magazzino Tornado, 1100 m² contro i 1300 m² di AutoStore, mentre per quanto riguarda il volume occupato è decisamente a favore del sistema stoccaggio 3D: 8500 m³ contro i 21000 m³. Questo rapporto continua all'aumentare della potenzialità di movimentazione oraria richiesta ma, mentre il sistema Tornado modifica la sua configurazione diminuendo la lunghezza dei corridoi e aumentando il numero degli stessi, il sistema AutoStore mantiene la sua configurazione e aumenta semplicemente il numero di robot. Questo fatto comporta due conseguenze: l'aumento dell'investimento in gru e navette in un caso e l'aumentare del traffico robot nell'altro. Questo comportamento si nota soprattutto dai 1500 bin/h in avanti.

| **Tornado** | | | |
|---|---|---|---|
| **PR = 75000 [bin]** | H = 19,20 [m] | N = 60 bin | E(DSC)=28,97 [s] |
| **PM = 650 [bin/h]** | L = 62,50 [m] | J = 125 bin | E(QC) = 26,42 [s] |
| PRreale = 75000 [bin] | W = 17,50 [m] | Ncorr = 5 | PMm = 131,18 [bin/h ] |
| PMreale = 655 [bin/h] | A = 1093,75 [m²] | V = 21000 [m³] | |
| **PR = 75000 [bin]** | H = 19,20 [m] | N = 60 bin | E(DSC)=25,65 [s] |
| **PM = 1000 [bin/h]** | L = 45,00 [m] | J = 90 bin | E(QC) = 24,07 [s] |
| PRreale = 75600 [bin] | W = 24,50 [m] | Ncorr = 7 | PMm = 145,73 [bin/h ] |
| PMreale = 1020 [bin/h] | A = 1102,50 [m²] | V = 21168 [m³] | |
| **PR = 75000 [bin]** | H = 19,20 [m] | N = 60 bin | E(DSC)=23,08 [s] |
| **PM = 1500 [bin/h]** | L = 31,50 [m] | J = 63 bin | E(QC) = 23,00 [s] |
| PRreale = 75600 [bin] | W = 35,00 [m] | Ncorr = 10 | PMm = 156,28 [bin/h ] |
| PMreale = 1562 [bin/h] | A = 1102,50 [m²] | V = 21168 [m³] | |
| **PR = 75000 [bin]** | H = 19,52 [m] | N = 61 bin | E(DSC)=21,82 [s] |
| **PM = 2000 [bin/h]** | L = 24,00 [m] | J = 48 bin | E(QC) = 22,79 [s] |
| PRreale = 76000 [bin] | W = 45,50 [m] | Ncorr = 13 | PMm = 160,71 [bin/h ] |
| PMreale = 2089 [bin/h] | A = 1092,00 [m²] | V = 21316 [m³] | |
| **PR = 75000 [bin]** | H = 6,40 [m] | N = 20 bin | E(DSC)=22,38 [s] |
| **PM = 2500 [bin/h]** | L = 62,5 [m] | J = 125 bin | E(QC) = 20,73 [s] |
| PRreale = 75000 [bin] | W = 52,5 [m] | Ncorr = 15 | PMm = 131,18 [bin/h ] |
| PMreale = 2524 [bin/h] | A = 3281,25 [m²] | V = 21000 [m³] | |

***Tab. 5.16.*** *Dati riassuntivi delle dimensioni e delle prestazioni di un sistema Tornado in varie configurazioni.*

L'ultimo caso è diverso dagli altri e serve per evidenziare alcune caratteristiche dei due sistemi. Per ottenere una PM di 2500 bin/h il sistema AutoStore ha come soluzione solo l'aumento del numero dei robot, portando ad un chiaro congestionamento con 188 robot attivi. Per il sistema Tornado invece oltre ad accorciare i corridoi si possono anche abbassare le navate aumentando così il numero di corridoi e raggiungendo la PM richiesta mantenendo intatta la PR. Come dimostrato in tabella, abbassando a 6,4 metri l'altezza del magazzino (non a caso quella massima di AutoStore), l'area calpestabile occupata triplica, il volume occupato resta costante, sempre elevato rispetto ad Autostore, e si raggiungono i 2500 bin/h con un aumento di solo 2 gruppi gru/navetta rispetto alla richiesta precedente. Questo dimostra come la soluzione Tornado sia comunque flessibile, ma solo nel caso in cui si abbia carta bianca per dimensioni e investimenti sulle strutture.

Concludendo si può affermare che il sistema AutoStore sia un sistema più lento rispetto al Tornado, e questo è dato dalla configurazione fisica 3D che rende difficilmente raggiungibili alcuni bin, mentre il secondo sistema punta proprio sull'elevata potenzialità di movimentazione. Per quanto riguarda la potenzialità ricettiva, avendo la stessa area a disposizione, risulta discriminante l'altezza a cui si può spingere la struttura esterna del magazzino, fino ad una certa quota AutoStore permette di stoccare più bin, oltre la maggior altezza delle scaffalature Tornado crea più posti magazzino, soprattutto nelle configurazioni a doppia o quadrupla profondità. Importante è la flessibilità del sistema: AutoStore si adatta maggiormente alle strutture già esistenti ed è facilmente espandibile, mentre Tornado necessita di una data configurazione fisica per sviluppare in lunghezza i corridoi e non aumentare in maniera spropositata il numero di gru e navette. Oltre la flessibilità hardware, si analizza anche la flessibilità software, dove il magazzino 3D spicca per la sua capacità di integrarsi perfettamente nella supply chain, permettendo direttamente ai clienti di creare e inizializzare gli ordini, risultando così perfetto per l'e-commerce, dove una volta concluso l'ordine del cliente partono direttamente i robot per crearlo e spedirlo. Inoltre generalmente gli ordini effettuati on-line sono composti da 1 o 2 item, velocizzando così la spedizione del pacco. Inoltre se il magazzino contiene non troppa varietà di prodotti il sistema AutoStore migliora le sue prestazioni.
La velocità di recupero dei bin nel sistema Tornado consiglia invece l'utilizzo di tale soluzione in realtà industriali in cui sono richieste velocità di recupero e grandi variabilità nel comporre un ordine, come ad esempio in reparto di minuteria, dove sono necessari molti item diversi per poter chiudere un ordine.
E' quindi necessario aver ben chiaro in che in che ambiente deve essere introdotto il sistema, le necessità di output, le limitazioni per quanta riguarda l'altezza e prendere in considerazione gli eventuali sviluppi futuri del mercato, e quindi del magazzino, prima di scegliere il sistema più adatto alla specifica situazione.

# BIBLIOGRAFIA


Ashayeri J., R.M. Heuts, M.W.T. Valkenburg, H.C. Veraart, M.R. Wilhelm. 2002. A geometrical approach to computing expected cycle times for zone based storage layouts in AS/RS. *International Journal of Production Research* 40 (17) 4467-4483.

Automotion Parking Systems. 2011. Park, Swipe, Leave Systems, available online at: http://www.automotionparking.com/index.php

Bartholdi, J.J., K.R. Gue. 2000. Reducing labor costs in an LTL cross-docking terminal. *Operations Research* 48 823-832.

Bartholdi, J.J., K.R. Gue. 2004. The best shape for a cross-dock. *Transportation Science* 38 235-244.

Boysen, N., M. Fliedner. 2010. Cross dock scheduling: Classification, literature review and research agenda. *Omega* 38 413-422.

Bozer, Y.A., J.A. White. 1984. Travel-time models for automated storage/retrieval systems. *IIE Transactions* 16(4) 329-338.

Bureau of Labor Statistics (BLS) report. 2004. Available online at: http://useconomy.about.com/od/supply/p/Aging_Workers.htm

Chen, L., A. Langevin, D. Riopel. 2010. The storage location assignment and interleaving problem in an automated storage/retrieval system with shared storage. *International Journal of Production Research* 48(4) 991-1011..

De Koster, M.B.M, T. Le-Duc, and K.J. Roodbergen. 2007. Design and Control of Warehouse Order Picking: A Literature Review. *European Journal of Operational Research* 182 (2) 481–501.

De Koster, M.B.M, B.M. Balk. 2008. Benchmarking and monitoring international warehouse operations in Europe. *Production and Operations Management* 17(2) 175-183.

De Koster, M.B.M., T. Le-Duc, Y. Yu. 2008. Optimal storage rack design for a 3-dimensional compact AS/RS. *International Journal of Production Research* 46(6) 1495-1514.

Eynan, A., M.J. Rosenblatt (1994) Establishing zones in single-command class-based rectangular AS/RS. *IIE Transactions* 26 (1) 38-46.

EZ-Indus. 2011. UCW container storage system, available online at: http://www.ezindus.com

Fudan, Thesis Autostore.

Fukunari, M. and Malmborg, C. J., 2007. An efficient cycle time model for autonomous vehicle storage and retrieval Systems. *International Journal of Production Research* 46(12) 3167-3184.

Goetschalckx, M., H.D. Ratliff. 1990. Shared storage policies based on the duration stay of unit loads. *Management Science* 36(9) 1120-1132.

Graves, S.C., W.H. Hausman, L.B. Schwarz. 1977. Storage-retrieval interleaving in automatic warehousing systems. *Management Science* 23(9) 935-945.

Gue, K.R. 2006. Very high-density storage systems. *IIE Transactions* 38(1) 79-90.

Gue, K.R., B.S. Kim. 2007. Puzzle-based storage systems. *Naval Research Logistics* 54(5), 556-567.

Han, M.H., L.F. McGinnis, J.S. Shieh, J.A. White. 1987. On sequencing retrievals in an automated storage/retrieval system. *IIE Transactions* 19(1) 56-66.

Hausman, W.H., L.B. Schwarz, S.C. Graves. 1976. Optimal storage assignment in automatic warehousing systems. *Management Science* 22(6) 629-638.

Hu, Y.H., S.Y. Huang, C. Chen, W.J. Hsu, A.C. Toh, C.K. Loh, T. Song. 2005. Travel time analysis of a new automated storage and retrieval system. *Computers & Operations Research* 32(6) 1515-1544.

Hyundai Elevator Co. Ltd. 2011. Hyundai Integrated Parking System (HIP), available online at: http://hyundaielevator.co.kr/eng/parking/car/automobile.jsp.

Keserla, A., B.A. Peters. 1994. Analysis of dual-shuttle automated storage/retrieval systems. *Journal of Manufacturing Systems* 13(6) 424-434.

Kim, J., A. Seidmann. 1990. A framework for the exact evaluation of expected cycle times in automated storage systems with full-turnover item allocation and random service requests. *Computers and Industrial Engineering* 18(4) 601-612.

Kouvelis, P., V. Papanicolaou. 1995. Expected travel time and optimal boundary formulas for a twoclass- based automated storage/retrieval system. *International Journal of Production Research* 33(10) 2889-2905.

Kuo, P.H., A. Krishnamurthy, C.J. Malmborg. 2007. Design models for unit load storage and retrieval systems using autonomous vehicle technology and resource conserving storage and dwell point policies. *Applied Mathematical Modeling* 31 2332-2346.

Malmborg, C.J. 1996. Storage assignment policy tradeoffs. *International Journal of Production Research* 34(2) 363-378.

Malmborg, C.J. 2000. Interleaving models for the analysis of twin shuttle automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research* 38(18) 4599-4610.

Malmborg, C.J., 2002. Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research* 40(8) 1807-1822.

Mirazaei, M., Zaerpour, N., de Koster, R. Modelling load retrievals in Puzzle-based storage systems. Rotterdam school of managment.

Modern material handling. 2012. Available online at: http://www.mmh.com/

Napolitano, M. 2010. Warehouse/DC Equipment & Technology: Materials Handling Trends and Future

Navstors. 2011. Naval automatic stowage and retrieval system, available online at: http://www.agilesystems.com/navstors_frame.htm.

OTDH. 2011. Magic black box, available online at: http://www.odth.be/solutions.php.

Park, B.C. 2001. An optimal dwell point policy for automated storage/ retrieval systems with uniformly distributed, rectangular racks. *International Journal of Production Research* 39(7) 1469-1480.

Park, B.C. 2006. Performance of automated storage/retrieval systems with non-square-in-time racks and two-class storage. *International Journal of Production Research* 44(6) 1107-1123.

Park, B.C., R.D. Foley, J.A. White, E.H. Frazelle. 2003. Dual command travel times and miniload system throughput with turnover-based storage. *IIE Transactions* 35(4) 343-355.

Park, Y.H., D.B. Webster. 1989b. Design of class-based storage racks for minimizing travel time in a three-dimensional storage system. *International Journal of Production Research* 27(9) 1589-1601.

Persona, A., Sgarbossa, F., et altri. Innovative travel time for a dual shuttle automated retrieval systems. *Computers & Industrial Engeneering 61 (2011) 600-607.*

Roodbergen, K.J., I.F.A. Vis. 2009. A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research* 194(2) 343-362.

Sari, Z., C. Saygin, N. Ghouali. 2005. Travel-time models for flow-rack automated storage and retrieval systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 25 979-987.

Sarker, B.R., A. Sabapathy, A.M. Lal, M.H. Ha. 1991. Performance evaluation of a double shuttle automated storage and retrieval system. *Production Planning and Control* 2(3) 207-213.

Persona, A., Sgarbossa, F., et altri. Innovative travel time for a dual shuttle automated retrieval systems. *Computers & Industrial Engeneering 61 (2011) 600-607.*

Roodbergen, K.J., I.F.A. Vis. 2009. A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research* 194(2) 343-362.

Slocum, J., D. Sonneveld. 2006. *The 15 Puzzle book*. Slocum Puzzle Foundation.

Swisslog online at: http://www.swisslog.com/

Van den Berg, J.P., A.J.R.M. Gademann. 2000. Simulation study of an automated storage/retrieval system. *International Journal of Production Research* 38 (6) 1339-1356.

Yu, Y., M.B.M. de Koster. 2009a. Designing an optimal turnover based storage rack for a 3D compact AS/RS. *International Journal of Production Research* 47(6), 1551-1571.

Yu, Y., M.B.M. de Koster. 2009b. Optimal zone boundaries for two-class-based compact three dimensional automated storage and retrieval systems. *IIE Transactions* 41 (3) 194-208.

Yu, Y., M.B.M. de Koster. 2012. Sequencing heuristics for storing and retrieving unit loads in 3D compact storage and retrieval systems. *IIE Transactions* 44(2) 69-87.

Yu, Y., M.B.M. de Koster. 2012. On the suboptimality of full turnover-based storage. *International Journal of Production Research,* to appear.

Zaerpour, N., Y. Yu, M.B.M. de Koster. 2010. Storing fresh produce for fast retrieval in an automated compact cross-dock system, working paper, Rotterdam School of Management, Erasmus University, Rotterdam, the Netherlands.

Zaerpour, N., Y. Yu, M.B.M. de Koster. 2011. Optimal configuration of a live-cube compact storage system in service industries, working paper, Rotterdam School of Management, Erasmus University, Rotterdam, the Netherlands.

Zaerpour, N., Y. Yu, M.B.M. de Koster. 2012a. Response time analysis of a live-cube compact storage system with two classes, working paper, Rotterdam School of Management, Erasmus University, Rotterdam, the Netherlands.

Zaerpour, N., Y. Yu, M.B.M. de Koster. 2012b. Optimal two-class-based storage in a live-cube compact storage system, working paper, Rotterdam School of Management, Erasmus University, Rotterdam, the Netherlands.

Zaerpour, N., M.B.M. de Koster, Y. Yu. 2012c. Storage policies and optimal shape of a storage system, working paper, Rotterdam School of Management, Erasmus University, Rotterdam, the Netherlands.

Zaepour 2013, Efficient Managmnt of compact storage system.