

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale
percorso Logistico

PROGETTAZIONE DI SISTEMI DI TRASPORTO INNOVATIVI PER MAGAZZINI AUTOMATICI



Relatore:

LOMBARDI Franco

Correlatori:

TRAINI Emiliano

BRUNO Giulia

Candidato:

DEGIOVANNI Davide

Anno accademico 2019/2020

This work is subject to the Creative Commons Licence

All Rights Reserved

*«Mollare, non mollare... spaghetti, non spaghetti.
Ti preoccupi troppo per ciò che era e ciò che sarà.
C'è un detto: ieri è storia, domani è un mistero,
ma oggi è un dono...
per questo si chiama presente.»*

Maestro Oogway

ABSTRACT

PROGETTAZIONE DI SISTEMI DI TRASPORTO INNOVATIVI PER MAGAZZINI AUTOMATICI

Questa tesi ha lo scopo di fornire un nuovo modello analitico che permetta di stimare i consumi energetici degli spostamenti all'interno di un magazzino automatizzato con sistema AVSRS. Per la valutazione energetica è proposto, inoltre, un nuovo modello energetico che differenzia i consumi sull'asse delle Y al variare del tipo di moto, ovvero ascendente o discendente. Nel primo modello viene preso in considerazione un sistema composto da un lift, uno shuttle e un satellite; inoltre, viene calcolato empiricamente il numero di switch orizzontali effettuati dallo shuttle all'interno di un ciclo multiplo generico. Con questo lavoro, è possibile confrontare i consumi energetici sia di magazzini costruiti con layout differenti sia di logiche di stoccaggio diverse, quest'ultime rappresentate tramite distribuzione di probabilità, all'interno dello stesso magazzino.

Keywords: AVS/RS; automated storage and retrieval system; automated warehouse; warehousing; modello energetico; modello analitico.

SOMMARIO

Pagina

ABSTRACT	III
SOMMARIO	IV
LISTA DELLE FIGURE	VI
LISTA DELLE SIGLE.....	VII
LISTA DELLE VARIABILI	VIII
INCIPIT	12
INTRODUZIONE AI MAGAZZINI: DAI CLASSICI AI SISTEMI AUTOMATIZZATI	13
1.1 Classificazione dei magazzini	13
1.1.1 Magazzini tradizionali o meccanizzati.....	14
1.1.2 Magazzini automatici (AWS)	14
1.1.3 Magazzini per UDC di piccole dimensioni	15
1.2 Logiche di funzionamento dei magazzini	15
1.3 Indici di performance dei magazzini.....	17
1.3.1 Tempo ciclo.....	18
1.3.2 Ricettività.....	18
1.3.3 Selettività.....	18
1.3.4 Coefficiente di utilizzazione superficiale	19
1.3.5 Coefficiente di utilizzazione volumetrico	19
1.3.6 Throughput.....	19
1.3.7 Rotazione merci	19
1.3.8 Giorni di copertura.....	20
1.3.9 Consumo energetico.....	20
1.4 Classificazione degli Automated Warehouse System (AWS)	20
1.4.1 Automated Storage and Retrieval Systems with Cranes or Automated Forklifts (ASRS) 21	
1.4.2 Vertical Lift Modules e Caroselli (VLM).....	23
1.4.3 AGV System.....	24
AUTOMATED VEHICLE STORAGE & RETRIEVAL SYSTEM (AVSRS)	26
2.1 Aisle-Based Shuttle System.....	26
2.2 Grid-Based Shuttle System.....	28
2.2.1 Grid Store.....	29
2.2.2 Grid Pick.....	29
2.2.3 Live-Cube Compact Storage	30
2.2.4 Grid Flow System.....	30
2.2.5 Robot-Based Compact Storage and Retrieval Systems (RCSR)	30
2.3 Tempo ciclo per Aisle-Based AVSRS	31
2.4 Stato dell'arte.....	32
MODELLO ENERGETICO.....	34
3.1 Caratterizzazione assi di movimentazione	34
3.2 Caratteristiche cinematiche del moto.....	36

3.3	Calcolo delle potenze specifiche	41
3.3.1	Consumi relativi agli spostamenti	41
3.3.2	Consumi relativi alle prese in carico delle UDC	44
3.4	Calcolo dell'Energia	45
MODELLO ANALITICO PER IL CONSUMO ENERGETICO ATTESO IN AVSRS.....		46
4.1	Calcolo degli spostamenti medi sui vari assi.....	46
4.1.1	Spostamento medio da baia di carico a livello generico j.....	46
4.1.2	Spostamento medio da livello generico j a baia di scarico	47
4.1.3	Spostamento medio da generico livello <i>j1</i> a generico livello <i>j2</i>	47
4.2	Calcolo probabilità tipo di moto: ascendente o discendente	47
4.3	Calcolo del consumo energetico medio nel caso di ciclo singolo o doppio	49
4.4	Calcolo del consumo energetico medio nel caso di cicli multipli.....	51
4.5	Focus su Switch orizzontali e verticali.....	53
4.6	Calcolo dei consumi energetici finali	53
4.7	Verifica modello analitico	53
CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....		57
APPENDICE A: VALIDAZIONE DEL MODELLO ENERGETICO.....		58
APPENDICE B: CALCOLO DEI VALORI RELATIVI AL NUMERO DI SWITCH MEDIO (S) ED IL NUMERO MEDIO DI UDC MOVIMENTATE (W_c).....		60
APPENDICE C: VERIFICA DEL MODELLO ANALITICO TRAMITE SIMULATORE....		67
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....		68

LISTA DELLE FIGURE

Figura	Pagina
FIGURA 1 - SCHEMA ESEMPLIFICATIVO DELLE AREE FUNZIONALI DEL MAGAZZINO.....	16
FIGURA 2 - RAPPRESENTAZIONE DELLE TIPOLOGIE DI FLUSSI DI MERCI NEI MAGAZZINI.....	16
FIGURA 3 - SCHEMA: TIPOLOGIE DI MAGAZZINI AUTOMATIZZATI.....	21
FIGURA 4 - SISTEMA DI STOCCAGGIO ASRS: A) SINGOLA PROFONDITÀ; B) MULTI-PROFONDITÀ.....	22
FIGURA 5 - A) ESEMPIO DI VML; B) SISTEMA DI EROGAZIONE AUTOMATICO A-FRAME.....	23
FIGURA 6 - RAPPRESENTAZIONE SISTEMA DI IMMAGAZZINAMENTO RMF: A) ROBOT E INVENTORY POD; B) LAYOUT CON UNA WORKSTATION.....	25
FIGURA 7 - RAPPRESENTAZIONE DI DUE SISTEMI AGV.....	25
FIGURA 8 - RAPPRESENTAZIONE DI MAGAZZINI CON SISTEMA AVSRs: A) SINGOLA PROFONDITÀ; B) MULTI PROFONDITÀ... ..	27
FIGURA 9 - GIOCO DEL 15.....	28
FIGURA 10 - ESEMPIO DI FUNZIONE DI PRELIEVO IN SISTEMA GRID-BASED SHUTTLE.....	28
FIGURA 11 - ESEMPIO DI FUNZIONAMENTO IN SISTEMA GRID STORE.....	29
FIGURA 12 - ESEMPIO DI FUNZIONAMENTO DI SISTEMA GRID PICK.....	29
FIGURA 13 - ESEMPIO DI SISTEMA LIVE-CUBE COMPACT STORAGE.....	30
FIGURA 14 - ESEMPIO DI SISTEMA GRID FLOW.....	30
FIGURA 15 - ESEMPIO DI SISTEMI RCSR: A) VISTA GENERALE; B) STRUTTURA MAGAZZINO; C) SISTEMA DI MOVIMENTAZIONE ROBOTICA; D) POSTAZIONE DI LAVORO.....	31
FIGURA 16 - RAFFIGURAZIONE DEGLI ASSI DI MOVIMENTAZIONE.....	35
FIGURA 17 - RAPPRESENTAZIONE DI DUE SISTEMI: A SINISTRA, PALLET LIFTER; A DESTRA, SHUTTLE LIFTER.....	36
FIGURA 18 - GRAFICI DI PROFILI DI VELOCITÀ, NEL CASO REALE.....	36
FIGURA 19 - GRAFICI DI PROFILI DI VELOCITÀ, SECONDO NOSTRE ASSUNZIONI.....	37
FIGURA 20 - GRAFICI DI PROFILI DI VELOCITÀ, IN CASO DI NON RAGGIUNGIMENTO DELLA VELOCITÀ MASSIMA.....	37
FIGURA 21 - GRAFICO RIASSUNTIVO DELLE FORMULE COINVOLTE NEL MODELLO CINEMATICO.....	40
FIGURA 22 - RAFFIGURAZIONE DELLE FORZE VETTORIALI PRESENTI NEL MOTO.....	41
FIGURA 23 - GRAFICO RIASSUNTIVO DELLE FORMULE COINVOLTE NEL MODELLO ENERGETICO.....	44
FIGURA 24 - TABELLA DEI VALORI DI S	51
FIGURA 25 - TABELLA DEI VALORI DI \bar{V}_c	51
FIGURA 26 - PLOT DEL CONSUMO ENERGETICO PER OGNI MACCHINARIO, NEL CASO DI CICLO COMPOSTO DA DUE INPUT E DA DUE OUTPUT.....	54
FIGURA 27 - PLOT DEL CONSUMO ENERGETICO PER OGNI MACCHINARIO, NEL CASO DI CICLO COMPOSTO DA TRE INPUT E DA TRE OUTPUT.....	55
FIGURA 28 - PLOT DEL CONSUMO ENERGETICO PER OGNI MACCHINARIO, NEL CASO DI CICLO COMPOSTO DA QUATTRO INPUT E DA QUATTRO OUTPUT.....	56

LISTA DELLE SIGLE

Sigla	Descrizione
UDC	Unità di carico
AWS	Automated Warehouse System
Rack	Scaffalature e Ubiche
ASRS	Automated Storage and Retrieval Systems
VLM	Vertical Lift Modules
AGV	Automated Guided Vehicle
AVSRS	Automated Vehicle Storage & Retrieval System
T2T	Tier-to-Tier oppure Pallet Lifter
TC	Tier Captive oppure Shuttle Lifter
RCSR	Robot-Based Compact Storage and Retrieval Systems
I-P	Input Point oppure Baia di carico
O-P	Output Point oppure Baia di scarico
RMF	Movable Rack - Robotic Mobile Fulfillment Systems

LISTA DELLE VARIABILI

Simbolo	Descrizione
x	Asse x
y	Asse y
z	Asse z
N_x	Numero di canali presenti in ogni livello del magazzino
N_y	Numero di livelli presenti nel magazzino
N_z	Numero di ubiche presenti in ogni canale del magazzino
l_x	Lunghezza dell'ubica
h	Altezza dell'ubica
l_z	Larghezza dell'ubica
$s_x(i)$	Spostamento lungo l'asse x
$s_y(j)$	Spostamento lungo l'asse y
$s_z(k)$	Spostamento lungo l'asse z
$t_x(i)$	Tempo di utilizzo del macchinario lungo l'asse x
$t_y(j)$	Tempo di utilizzo del macchinario lungo l'asse y
$t_z(k)$	Tempo di utilizzo del macchinario lungo l'asse z
a_x	Accelerazione lungo l'asse x
a_y	Accelerazione lungo l'asse y
a_z	Accelerazione lungo l'asse z
d_x	Decelerazione lungo l'asse x
d_y	Decelerazione lungo l'asse y
d_z	Decelerazione lungo l'asse z
$v_{x,sup}$	Massima velocità raggiungibile dal macchinario sull'asse x
$v_{y,sup}$	Massima velocità raggiungibile dal macchinario sull'asse y
$v_{z,sup}$	Massima velocità raggiungibile dal macchinario sull'asse z
$v_{x,set}(i)$	Velocità massima settata per la specifica missione sull'asse x
$v_{y,set}(j)$	Velocità massima settata per la specifica missione sull'asse y
$v_{z,set}(k)$	Velocità massima settata per la specifica missione sull'asse z
$s_{x,a,set}(i)$	Spazio necessario per raggiungere $v_{x,set}$
$s_{y,a,set}(j)$	Spazio necessario per raggiungere $v_{y,set}$
$s_{z,a,set}(k)$	Spazio necessario per raggiungere $v_{z,set}$
$s_{x,d,set}(i)$	Spazio necessario per frenare da $v_{x,set}$
$s_{y,d,set}(j)$	Spazio necessario per frenare da $v_{y,set}$

$s_{z,d,set}(k)$	Spazio necessario per frenare da $v_{z,set}$
$s_{x,set}(i)$	Spazio necessario per raggiungere la fase di moto a velocità costante $v_{x,set}$
$s_{y,set}(j)$	Spazio necessario per raggiungere la fase di moto a velocità costante $v_{x,set}$
$s_{z,set}(k)$	Spazio necessario per raggiungere la fase di moto a velocità costante $v_{x,set}$
$v_{x,get}(i)$	Massima velocità raggiunta durante l'utilizzo nella missione sull'asse x
$v_{y,get}(j)$	Massima velocità raggiunta durante l'utilizzo nella missione sull'asse y
$v_{z,get}(k)$	Massima velocità raggiunta durante l'utilizzo nella missione sull'asse z
$t_{x,a}(i)$	Tempo necessario per raggiungere $v_{x,get}$
$t_{y,a}(j)$	Tempo necessario per raggiungere $v_{x,get}$
$t_{z,a}(k)$	Tempo necessario per raggiungere $v_{x,get}$
$t_{x,c}(i)$	Tempo di utilizzo del macchinario a velocità costante $v_{x,set}$
$t_{y,c}(j)$	Tempo di utilizzo del macchinario a velocità costante $v_{x,set}$
$t_{z,c}(k)$	Tempo di utilizzo del macchinario a velocità costante $v_{x,set}$
$t_{x,d}(i)$	Tempo necessario per frenare da $v_{x,get}$
$t_{y,d}(j)$	Tempo necessario per frenare da $v_{x,get}$
$t_{z,d}(k)$	Tempo necessario per frenare da $v_{x,get}$
m_x	Massa Shuttle (macchinario che si muove sull'asse x)
m_y	Massa Lift (macchinario che si muove sull'asse y)
m_z	Massa Satellite / Forche telescopiche (macchinario che si muove sull'asse z)
m_u	Massa della UDC da spostare durante la missione
$c_{r,x}$	Coefficiente di attrito sull'asse x
$c_{r,y}$	Coefficiente di attrito sull'asse y
$c_{r,z}$	Coefficiente di attrito sull'asse z
η_x	Rendimento di trasmissione sull'asse x
η_y	Rendimento di trasmissione sull'asse y
η_z	Rendimento di trasmissione sull'asse z
f_r	Fattore di resistenza della massa
g	Accelerazione di gravità
$p_{x,a}(i)$	Potenza specifica necessaria in accelerazione sull'asse x
$p_{x,c}(i)$	Potenza specifica necessaria a velocità costante sull'asse x
$p_{x,d}(i)$	Potenza specifica necessaria in decelerazione sull'asse x
$p_{y,a,U}(j)$	Potenza specifica necessaria in accelerazione in salita sull'asse y
$p_{y,c,U}(j)$	Potenza specifica necessaria a velocità costante in salita sull'asse y
$p_{y,d,U}(j)$	Potenza specifica necessaria in decelerazione in salita sull'asse y
$p_{y,a,D}(j)$	Potenza specifica necessaria in accelerazione in discesa sull'asse y

$p_{y,c,D}(j)$	Potenza specifica necessaria a velocità costante in discesa sull'asse y
$p_{y,d,D}(j)$	Potenza specifica necessaria in decelerazione in discesa sull'asse y
$p_{z,a}(k)$	Potenza specifica necessaria in accelerazione sull'asse z
$p_{z,c}(k)$	Potenza specifica necessaria a velocità costante sull'asse z
$p_{z,d}(k)$	Potenza specifica necessaria in decelerazione sull'asse z
$e_x(s_x)$	Energia specifica spesa sull'asse x
$e_{y,U}(s_y)$	Energia specifica spesa in salita sull'asse y
$e_{y,D}(s_y)$	Energia specifica spesa in discesa sull'asse y
$e_z(s_z)$	Energia specifica spesa sull'asse z
$E_x(s_x)$	Energia spesa sull'asse x
$E_y(s_y)$	Energia spesa sull'asse y
$E_z(s_z)$	Energia spesa sull'asse z
\bar{E}_U	Energia media spesa per la presa in carico o per lo stoccaggio di una UDC
π_i	Probabilità stazionarie di effettuare un'azione al canale i
π_j	Probabilità stazionarie di effettuare un'azione al livello j
π_k	Probabilità stazionarie di effettuare un'azione all'ubica k
x_{IN}	Distanza dall'origine sull'asse x della baia di carico
x_{OUT}	Distanza dall'origine sull'asse x della baia di scarico
y_{IN}	Distanza dall'origine sull'asse y della baia di carico
y_{OUT}	Distanza dall'origine sull'asse y della baia di scarico
z_{IN}	Distanza dall'origine sull'asse z della baia di carico
z_{OUT}	Distanza dall'origine sull'asse z della baia di scarico
$\bar{s}_{x,INCAN}$	Spostamento medio dalla baia d'ingresso ad un canale generico
$\bar{s}_{y,INLIV}$	Spostamento medio dalla baia d'ingresso ad un livello generico
$\bar{s}_{z,INPOS}$	Spostamento medio dalla baia d'ingresso ad un'ubica generica
$\bar{s}_{x,CANOUT}$	Spostamento medio da un canale generico alla baia di uscita
$\bar{s}_{y,LIVOUT}$	Spostamento medio da un livello generico alla baia di uscita
$\bar{s}_{z,POSOUT}$	Spostamento medio da un'ubica generica alla baia di uscita
$\bar{s}_{x,CANCAN}$	Spostamento medio tra due generici canali del magazzino
$\bar{s}_{y,LIVLIV}$	Spostamento medio tra due generici livelli del magazzino
$\pi_{y,D,INLIV}$	Probabilità di scendere in spostamento da baia di carico a generico livello
$\pi_{y,D,LIVOUT}$	Probabilità di scendere in spostamento da generico livello a baia di scarico
$\pi_{y,D,LIVLIV}$	Probabilità di scendere in spostamento da un generico livello ad un altro
U_{IN}	Numero di UDC da stoccare in una singola missione
U_{OUT}	Numero di UDC da prelevare in una singola missione

U_{TOT}	Numero di UDC movimentate in totale in una singola missione
\bar{E}_x	Energia media spesa sull'asse x
\bar{E}_y	Energia media spesa sull'asse y
\bar{E}_z	Energia media spesa sull'asse z
\bar{E}_{tot}	Energia media spesa nel magazzino

INCIPIT

Sin da quando gli esseri umani hanno iniziato a creare comunità non più tribali e nomadi, è sorto il problema del mantenimento delle scorte.

Un esempio può essere *Göbekli Tepe*, nel sud dell'Anatolia.

Questo sito archeologico è considerato come il primo insediamento umano nella storia. In questo luogo, già nel 9000 a.C gli edifici erano di struttura rettangolare. All'interno di ogni abitazione erano presenti differenti stanze e, alcune di queste, espletavano la funzione di officina o magazzino per le provviste. Da quel momento in poi, la nostra specie è cresciuta grazie alla sua capacità di creare e produrre attrezzi, cibo e strutture in grado di immagazzinare e conservare i propri prodotti.

Oggi, l'evoluzione umana ci ha portato ad essere in grado di creare sistemi, macchinari e strumenti di una complessità che, anche solo fino a due secoli fa, era considerata fantascienza. Ciò ci ha permesso di creare comunità e città formate da milioni di individui che, per poter vivere, necessitano di rifornimenti continui provenienti da territori esterni e un sistema di gestione altamente organizzato.

Negli anni, si sono sviluppati metodi logistici e organizzativi che permettono di raggiungere performance, a livello di tempistiche, formidabili. Questa continua corsa finalizzata a rendere tutto fruibile e istantaneo, ha portato a consumi elevatissimi. Per fortuna, negli ultimi anni, la nostra società ha iniziato a considerare necessario un metodo di lavoro finalizzato alla riduzione dei consumi.

L'obiettivo di questo studio è quello di fornire degli strumenti che permettano di modellizzare al meglio i magazzini automatizzati, portando in tal modo ad una riduzione dei consumi energetici.

Nella parte iniziale, verrà presentato un quadro generale dei magazzini e delle loro rispettive suddivisioni, logiche e indici di performance e, in secondo luogo, una classificazione delle diverse tipologie di magazzini automatizzati.

Successivamente, l'attenzione sarà incentrata sui magazzini automatizzati con sistemi di stoccaggio AVS/RS e sarà esposta una panoramica sullo stato dell'arte rispetto a questo tema.

Nella parte seguente, descriverò il modello energetico correlato di tutti gli studi riguardanti la cinematica e il calcolo delle potenze specifiche.

Infine, ci focalizzeremo sul modello analitico che permetterà di effettuare una stima dei consumi energetici su un ciclo generico.

INTRODUZIONE AI MAGAZZINI: DAI CLASSICI AI SISTEMI AUTOMATIZZATI

Il seguente capitolo è stato redatto attraverso l'uso delle fonti ^{1, 2, 3}.

1.1 Classificazione dei magazzini

Il magazzino è una struttura logistica che, insieme alle attrezzature di stoccaggio, a quelle di movimentazione e alle risorse umane e gestionali, consente di regolare le differenze tra i flussi di entrata delle merci, ad esempio, quelle ricevute dai fornitori o dai centri produttivi, e quelli di uscita, come le merci inviate alla produzione o alla vendita. In altre parole, il magazzino permette alle aziende di ricevere, conservare, distribuire e smistare le referenze. Solitamente, tali flussi sono coordinati.

Ci sono casi in cui un'impresa ha bisogno di avere vari edifici e differenti tipologie di magazzini per poter soddisfare le proprie necessità e perseguire i propri obiettivi. Inoltre, i vari impianti devono essere ubicati in funzione delle specifiche esigenze di funzionamento e in conformità delle restrizioni o delle possibilità presenti in ciascun contesto o luogo.

Si possono distinguere due macrocategorie di magazzini: **depositi di fabbrica** e **depositi distributivi**.

Questa classificazione però, rischia di essere troppo generalista. Per ovviare a questo problema, si tende a raggrupparli in base alle caratteristiche comuni quali:

- **Tipo di prodotto:** i magazzini possono essere specializzati in bobine, prodotti infiammabili, profilati, prodotti di piccole dimensioni, ricambi, prodotti deperibili o magazzini ad utilizzo generale.
- **Tipo di edificio:** magazzini all'aperto, capannoni, seminterrati, silos o depositi, celle frigorifere, magazzini autoportanti in cui le scaffalature costituiscono la struttura portante dell'edificio.
- **Flusso dei materiali:** gli impianti possono destinarsi a materie prime, componenti, prodotti semilavorati o prodotti finiti. Possono rivestire il ruolo di magazzino intermedio, di deposito o di hub distributivo.
- **Ubicazione:** la posizione a livello geografico di un impianto consente di classificare i magazzini in hub centrali, regionali e di transito.
- **Grado di automazione:** in questo caso, ci si riferisce alla quantità di attività che sono state automatizzate. A seconda dei livelli di automazione presenti in un impianto, parleremo di magazzini tradizionali (in cui la maggior parte del lavoro è svolta manualmente dagli operatori) o di magazzini automatici (processi e attività completamente automatizzati).

Infine, in base ai sistemi di immagazzinamento, si può fare un'ultima distinzione, riclassificando i magazzini in tre macroinsiemi:

- **Magazzini tradizionali o meccanizzati**
- **Magazzini automatici**
- **Magazzini per UDC di piccole dimensioni**

1.1.1 Magazzini tradizionali o meccanizzati

I magazzini tradizionali o meccanizzati sono i più comuni che si possono trovare all'interno delle imprese o in altri tipi di attività. Possono essere ulteriormente suddivisi in:

- **Magazzini statici:** la logica è quella di assegnare una posizione ad una UDC movimentata esclusivamente dal personale addetto in caso di operazioni di prelievo o stoccaggio. Il layout può essere a catasta, a scaffalature tradizionali o a scaffalature passanti.
- **Magazzini dinamici:** hanno l'obiettivo di ottimizzare l'utilizzazione dello spazio del magazzino riducendo le dimensioni dei corridoi di movimentazione. Questo è possibile perché le UDC non hanno una posizione fissa, ma sono in continua movimentazione. In base al sistema di movimento, si hanno magazzini a gravità, detti anche *live storage*, oppure magazzini con carrello di trasferimento.
- **Magazzini a scaffali mobili:** hanno lo stesso principio dei precedenti, eccetto il soggetto del movimento che non è quello delle UDC, ma degli scaffali dove esse vengono riposte. Vengono impiegati principalmente in biblioteche o in centri di ricambistica.

1.1.2 Magazzini automatici (AWS)

Questa tipologia di impianti di stoccaggio prevede l'utilizzo di macchinari automatici per la movimentazione dei vari materiali. Possono anche essere denominati **intensivi**, in riferimento all'elevato grado di utilizzo dello spazio, oppure **autoportanti** se le scaffalature ricoprono il doppio ruolo di stoccare le varie UDC e di sostenere le pareti oltre alla struttura intera del fabbricato. Le principali componenti sono:

- **Trasloelevatori**
- **Scaffalature**
- **Sistemi di movimentazione delle UDC**
- **Sistemi di trasmissione delle informazioni**
- **Sistemi di gestione hardware e software**
- **Componente civile** (fondazioni, pavimentazione, copertura, ecc.)

1.1.3 Magazzini per UDC di piccole dimensioni

Come dice il nome stesso, si tratta di strutture dedicate allo stoccaggio di materiali di dimensioni moderate a misura d'uomo e di minuterie. Seguono due differenti logiche di funzionamento:

- **Operatore verso materiali:** l'UDC rimane ferma, mentre l'operatore si muove per effettuare il prelievo o il refill. Si suddividono in cassettiere, scaffalature, scaffali mobili.
- **Materiale verso operatore:** l'operatore rimane fermo nella posizione assegnatagli ed il materiale viene portato nella posizione di prelievo o di refill. Possono essere classificati in caroselli dinamici (verticali o orizzontali) e miniload.

1.2 Logiche di funzionamento dei magazzini

Il magazzino è una struttura dinamica. L'immagine di deposito statico e tradizionale appare ormai obsoleta. Gli impianti moderni sono il cuore pulsante della logistica. Al loro interno si eseguono operazioni e processi, alcuni dei quali anche molto complessi. Ecco un elenco dei più rilevanti:

- **Operazioni di ricevimento merci:** si tratta di attività essenziali che prevedono una fase di registrazione e una di controllo.
- **Attività di trasporto interno:** consiste nell'attraversamento delle varie aree del magazzino. Queste possono avvenire in maniera tradizionale (manualmente o con l'ausilio dei mezzi di sollevamento) o si può optare per una più efficiente movimentazione automatica dei carichi.
- **Smistamento verso le aree di stoccaggio e conservazione:** le merci vengono immagazzinate in attesa di essere movimentate verso l'area di preparazione degli ordini. Qui avverrà il consolidamento dei carichi e, infine, la spedizione delle merci.
- **Aggiornamento delle informazioni:** si effettuano aggiornamenti relativi allo *stock* e alle giacenze. Inoltre, questo processo comprende una fase di controllo dei nuovi flussi in base alla domanda o alle previsioni.

I fattori e i processi illustrati fino ad ora influiscono in modo decisivo sul modo in cui si organizzerà l'edificio e permettono di allocare in maniera ottimale le varie aree funzionali presenti, quali:

1. **Banchine di ricevimento merci**
2. **Aree di ricevimento merci**
3. **Aree di stoccaggio UDC**
4. **Aree per l'allestimento degli ordini (*picking*) e imballaggio merci**
5. **Aree per la spedizione merci**
6. **Banchine di spedizione merci**

I settori del magazzino sono quindi suddivisibili in base al prodotto movimentato o alle fasi operative. Nell'immagine seguente (*Figura 1*), viene illustrato un esempio.

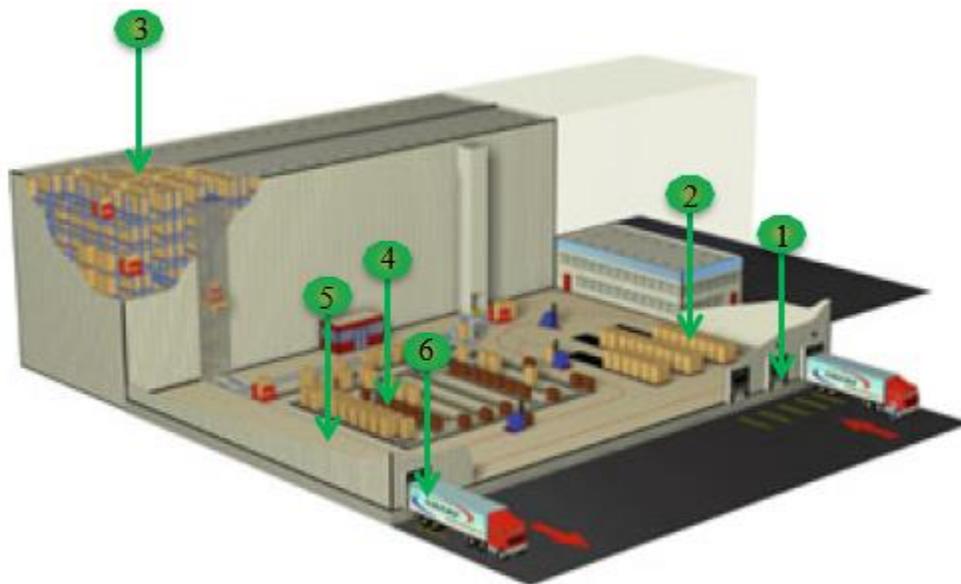


Figura 1 - Schema esemplificativo delle aree funzionali del magazzino.

Oltre agli aspetti precedentemente esposti bisogna considerare un ultimo fattore. Infatti, ogni magazzino segue una logica di gestione delle UDC che varia in base al tipo di servizio offerto e di prodotti trattati. Le logiche più comuni di gestione delle scorte che influenzano la struttura del magazzino sono due: **LIFO** e **FIFO**. Inoltre, i magazzini, specialmente quelli di tipologia *cross-docking*, possono avere differenti tipologie di flussi in entrata ed in uscita;

in *Figura 2* vengono illustrate tali varianti.

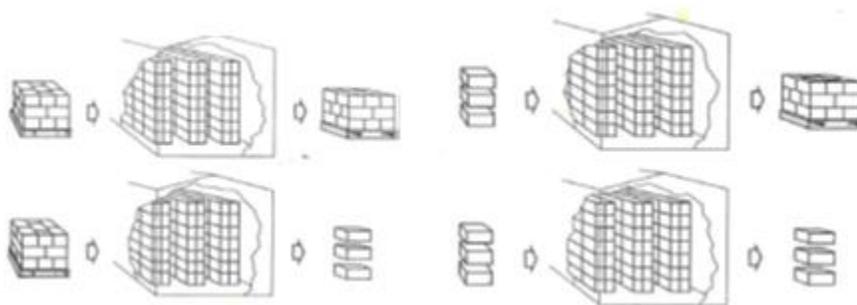


Figura 2 - Rappresentazione delle tipologie di flussi di merci nei magazzini.

Infine, resta un ultimo elemento da tenere presente. Tutti i magazzini seguono delle **logiche di allocazione fisica** delle UDC. Queste vengono scelte in base al tipo di prodotto trattato e generalmente sono classificabili in tre criteri:

1. Assegnazione delle singole voci a posizioni fisse;
2. Assegnazione casuale;
3. Classificazione delle tipologie dei materiali e assegnazione di una specifica zona del magazzino per ognuna di esse. Un esempio di classificazione classica è distinguere prodotti basso, medio e alto rotanti in base alla domanda.

1.3 Indici di performance dei magazzini

L'argomento di questo paragrafo deriva dallo studio dei testi ¹ e ⁴.

Gli indici di performance dei magazzini sono valori sintetici espressi sotto forma di **numeri interi, percentuali o ratio** elaborati in base alle diverse caratteristiche di ogni impianto.

Tali valori vengono usati principalmente per:

- Controllare l'evoluzione di un processo in un determinato arco di tempo;
- Basandosi sui numeri, prendere decisioni strategiche vincolate ed associate ad una funzione;
- Analizzare l'andamento del magazzino in relazione agli obiettivi presenti e futuri.

Grazie a questi indici è possibile aumentare **la redditività dell'impresa**. Pertanto, non si tratta solo di guardare i risultati "statistici" contenuti negli indicatori, ma bisogna interpretare gli indici come strumenti per allargare le possibilità di guadagno in più direzioni.

Esistono quattro gruppi di indicatori. Alcuni tornano particolarmente utili quando si intende ridurre i costi e i tempi delle operazioni; altri servono a migliorare la produttività (produrre di più con meno risorse) senza perdere qualità operativa. Essi sono:

- **Indicatori finanziari:** servono a monitorare i costi operativi legati al magazzino. Alcuni esempi: gli indici relativi alla percentuale di superficie occupata e l'indice di rotazione delle merci.
- **Indicatori legati alla produttività:** valutano l'efficienza dei processi mettendo a confronto produzione e risorse impiegate per ottenerla. Un esempio: il costo della manodopera e dei mezzi impiegati per la gestione di un determinato numero di unità di carico.
- **Indicatori legati alla velocità (tempi):** valutano il tempo di reazione di un magazzino ai vari ordini. Un buon esempio, in questo caso, è il tempo ciclo.

- **Indicatori legati alla qualità:** misurano il livello di servizio offerto ai clienti. Questi indicatori sono particolarmente utili per monitorare i livelli di efficienza legati alle attività di picking. Un esempio può essere il numero di ordini evasi correttamente rispetto gli ordini ricevuti.

Di seguito, sono elencati alcuni degli indicatori più conosciuti ed utilizzati nel mondo della logistica ed in particolare nella gestione dei magazzini.

1.3.1 Tempo ciclo

Il tempo ciclo, t_c , è uno degli indicatori più comuni e più utilizzati all'interno dei magazzini. Genericamente, rappresenta il tempo impiegato per compiere un ciclo completo. Nel caso dei magazzini, un ciclo semplice comprende tutte le fasi necessarie per prelevare o immettere nel magazzino una UDC.

Oltre a questo, all'interno di un ciclo si possono distinguere i tempi fissi e i tempi variabili:

- **Tempi fissi:** sono i tempi che non variano nei vari cicli e solitamente sono indipendenti dalla localizzazione delle UDC;
- **Tempi variabili:** sono quelli che dipendono strettamente dalla posizione delle UDC.

1.3.2 Ricettività

L'indice di ricettività, R , consiste nel numero totale di UDC stoccabili nel magazzino, cioè la sua capacità di stoccaggio. Nel caso di AVSRS, consiste nella somma delle ubiche presenti in ogni canale.

1.3.3 Selettività

L'indice di selettività, I_s , rappresenta la semplicità di prelievo di una UDC stoccata in un magazzino: maggiore è il valore dell'indice, migliore sarà la condizione di prelievo. Tale indice viene definito come:

$$I_s = \frac{N_{acc}}{R} \quad 1)$$

N_{acc} rappresenta il numero di UDC direttamente raggiungibili ed R è il numero totale di UDC stoccabili. Nel caso di AVSRS in cui si forza l'omogeneità dei canali rispetto ai prodotti, la selettività coincide con il numero di canali diviso il numero di ubiche totali, poiché N_{acc} equivale al numero di canali accessibili dal satellite.

1.3.4 Coefficiente di utilizzazione superficiale

Il coefficiente di utilizzazione superficiale, C_s , rappresenta quanto viene sfruttata la superficie calpestabile del magazzino. Tale coefficiente viene definito come:

$$C_s = \frac{S_{stoccaggio}}{S} \quad 2)$$

dove $S_{stoccaggio}$ rappresenta la superficie di magazzino occupata dalle ubiche, mentre S è la superficie calpestabile totale del magazzino.

1.3.5 Coefficiente di utilizzazione volumetrico

Il coefficiente di utilizzazione superficiale, C_v , rappresenta quanto viene sfruttato il volume del magazzino. Tale coefficiente viene definito come:

$$C_v = \frac{V_{stoccaggio}}{V} \quad 3)$$

in cui $V_{stoccaggio}$ rappresenta il volume occupato dalle ubiche di stoccaggio. V , invece, è il volume totale disponibile nel magazzino.

1.3.6 Throughput

L'indice di throughput, Th , è calcolato come numero di UDC movimentabili nell'unità di tempo. L'indice permette di stimare la flessibilità e la velocità di risposta di un magazzino ai vari ordini e al loro variare.

1.3.7 Rotazione merci

L'indice di rotazione, I_r , è uno dei più significativi per la gestione dei magazzini perché analizza la capacità di gestire efficacemente la rotazione delle scorte, ovvero di ottimizzare il livello di giacenze di magazzino rispetto ai consumi. Tale indice è calcolato come:

$$I_r = \frac{U_{transito}}{G} \quad 4)$$

in cui $U_{transito}$ sono le UDC uscite nell'unità di tempo, mentre G è la giacenza media nella stessa unità di tempo.

1.3.8 Giorni di copertura

L'indice dei giorni di copertura, GC , rappresenta i giorni lavorativi rispetto all'indice di rotazione delle merci e calcola i giorni previsti prima di arrivare a **rottura di Stock**. Permette di approfondire la misurazione del livello raggiunto dalle scorte rispetto ai consumi e, se il valore dell'indice risulta troppo elevato, denota la presenza di giacenze sovradimensionate. Quanto sia elevato il valore dell'indice, dipende sempre dalla logica che si adotta riguardo la gestione delle scorte e dei rifornimenti. Tale indice è calcolato come:

$$GC = \frac{GG}{I_r} \quad 5)$$

dove GG sono i giorni lavorativi, mentre I_r è l'indice di rotazione del magazzino.

1.3.9 Consumo energetico

In letteratura, non sono presenti degli indici specifici che riguardino il consumo energetico; ciò non toglie che si possa calcolare un indicatore che permetta di stimare il consumo del magazzino. Una possibile traduzione di questo indice può consistere nel calcolare, nell'unità di tempo, quanta energia è stata spesa rispetto ai cicli compiuti. Possiamo, quindi, definire C_e come:

$$C_e = \frac{E \times 60}{t_c} \quad 6)$$

dove E rappresenta l'energia spesa, t_c è il tempo ciclo e 60 è un fattore che permette di riportare l'indice all'unità di tempo oraria.

1.4 Classificazione degli Automated Warehouse System (AWS)

Il termine *automazione* viene introdotto negli anni '40 da J. Diebold per descrivere il largo impiego di apparecchiature automatiche manifestatosi soprattutto nell'industria automobilistica. Da quel momento, iniziarono a nascere i primi robot industriali e poi, negli anni '60, ebbe inizio l'automazione all'interno dei magazzini, che si focalizzava soprattutto sul sollevamento e sullo spostamento di carichi pesanti. I sistemi di stoccaggio automatizzati si sono sviluppati enormemente e, negli anni '80, è stato creato **un magazzino di pallet ad alta baia completamente automatizzato** che utilizzava gru impilatrici e trasportatori di pallet, riducendo drasticamente l'ingombro e la manodopera.

Quello è stato il **primo esempio di magazzino automatizzato moderno** e, con l'evoluzione tecnologica relativa a tale settore, questi sistemi sono stati sviluppati inglobando alle fasi di stoccaggio e di recupero dei carichi di unità, quelle di smistamento, raccolta ed imballaggio.

Esistono differenti tipologie di magazzini automatizzati e, per poterli classificare, il metodo più comune è quello che li raggruppa in base alle tecnologie e ai sistemi di prelievo e di stoccaggio previsti. Se ne distinguono quattro famiglie, come visibile in **Figura 3**.

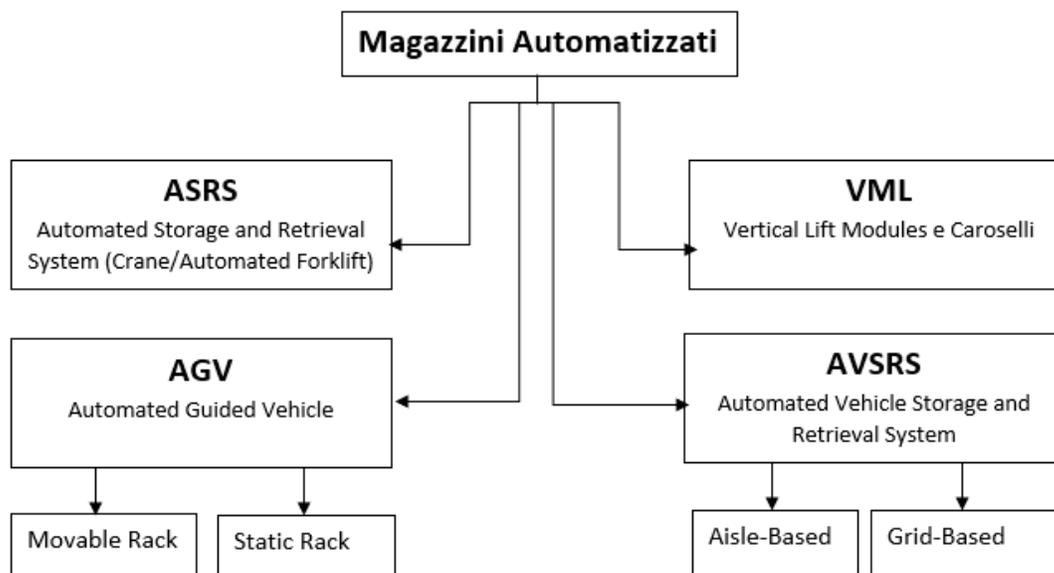


Figura 3 – Schema: tipologie di magazzini automatizzati.

Ulteriori approfondimenti sul tema sono ritracciabili in ⁵.

1.4.1 Automated Storage and Retrieval Systems with Cranes or Automated Forklifts (ASRS)

Tale tecnologia è una delle prime utilizzate nei magazzini automatizzati ed è costituita dalla **struttura di stoccaggio**, detta anche *rack*, e dai **sistemi automatizzati di movimentazione**, come le gru oppure i carrelli elevatori. La struttura di stoccaggio può raggiungere anche i 30 o 40 metri d'altezza ed è divisa in canali separati da un corridoio dotato di linee-guida per i sistemi di movimentazione. Per prelevare o immagazzinare una UDC, una gru la preleva all'inizio del magazzino, solitamente da un nastro trasportatore, e, percorrendo le linee-guida presenti nel corridoio, la alloca nell'ubica assegnatagli. Gli spostamenti orizzontali e verticali per raggiungere la posizione corretta sono eseguiti contemporaneamente.

La struttura di stoccaggio può essere a singola (

Figura 4 a)) o a **doppia profondità** e, a tal fine, le gru sono dotate di forcole telescopiche a doppia profondità. Questa tecnologia, però, può essere anche pensata con una struttura più compatta cioè di multi-profondità (**Figura 4 b)**).

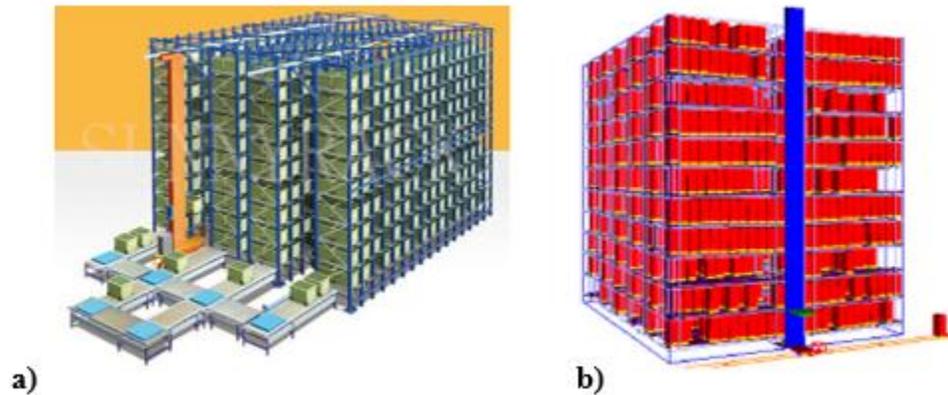


Figura 4 - Sistema di stoccaggio ASRS: a) singola profondità; b) multi-profondità.

La profondità di stoccaggio dipende dal tipo di prodotto e dalla tecnologia. I sistemi a multi-profondità sono utilizzati soprattutto per la conservazione dei prodotti dove uno degli scopi è utilizzare il minor spazio possibile. Un esempio di questa logica possono essere i magazzini frigoriferi. Tipicamente, in un sistema multi-profondità, una gru si occupa delle movimentazioni lungo il corridoio, mentre un altro macchinario si occupa del movimento in profondità nei canali.

I sistemi di stoccaggio compatto basati su gru possono essere ulteriormente classificati in tre categorie, in base al meccanismo del movimento di profondità. Queste tre categorie sono sistemi *Rack push-back*, *Conveyor-based system* e *Satellite-based system*:

- **Rack push-back:** in questa variante, la gru (o carrello elevatore automatico) immagazzina i carichi, spingendoli meccanicamente nelle corsie di stoccaggio. Il sistema funziona secondo il principio LIFO. Una leggera pendenza sulla corsia di stoccaggio utilizza la gravità per garantire che un carico sia sempre disponibile davanti alla sua corsia. La profondità della corsia in un canale con sistema *pallet push-back* è fino a circa cinque UDC.
- **Conveyor-based system:** in questo caso, i canali sono dotati di sistemi trasportatori con solo due direzioni di movimento. L'operazione è LIFO e la logica è molto simile ai sistemi rack push-back. I trasportatori, inoltre, possono essere di due tipologie: **motorizzati** o **a semplice gravità**. I primi consentono uno stoccaggio più intensivo perché è possibile raggiungere una profondità maggiore rispetto ai sistemi a gravità.

- **Satellite-based system:** in questo sistema, un satellite collegato alla gru oppure una navetta con libertà di movimento, viene utilizzato per eseguire il movimento in profondità nel canale. Per effettuare un'operazione di stoccaggio, la gru prende il carico da immagazzinare con una navetta e si reca alla corsia di stoccaggio. Successivamente, la gru rilascia la navetta che viaggia lungo la corsia di stoccaggio per posizionare la UDC. La stessa logica vale anche per le operazioni di prelievo. In alcuni casi, le navette possono anche essere dedicate alle corsie. Se un sistema dispone di meno navette rispetto alle corsie di stoccaggio, la gru sposta le navette tra le corsie. Un'evoluzione di tale tecnologia sono i **sistemi AVSRS** che verranno trattati più nel particolare nel *capitolo 3*.

Uno dei maggiori svantaggi dello stoccaggio intensivo è che, a meno che il sistema non sia progettato appositamente, le ubiche sono accessibili solo da un lato. Pertanto, le UDC vengono recuperate in base al principio LIFO o vengono sottoposte a più ricollocazioni e rimescolamenti per consentire l'accesso al pallet giusto.

1.4.2 Vertical Lift Modules e Caroselli (VLM)

I **VML** sono sistemi di immagazzinamento simili ai caroselli anche se con un funzionamento differente. In questa tecnologia, sono presenti due colonne di vassoi con un inserto, detto **estrattore**, montato in un ascensore centrale (*Figura 5 a*).

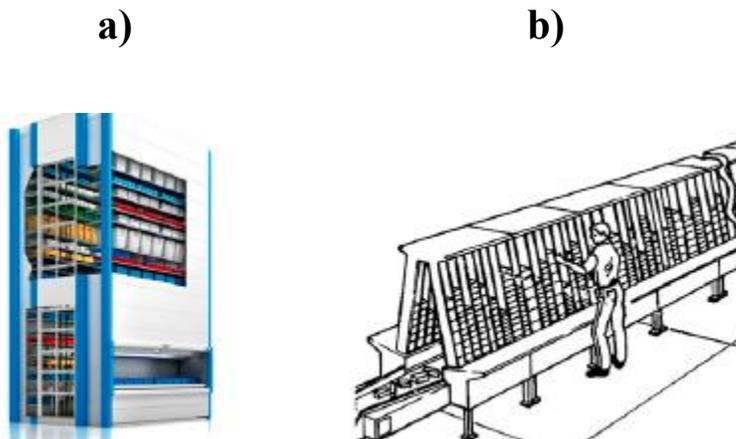


Figura 5 - a) esempio di VML; b) sistema di erogazione automatico A-frame.

Quando arriva un ordine di prelievo, l'estrattore individua i vassoi in cui è memorizzata la presenza dell'elemento richiesto e porta il vassoio nella posizione specifica. Come nei caroselli, la posizione di prelievo è sulla parte frontale del sistema.

Con questa tecnologia, chi deve effettuare il prelievo ha una posizione fissa e, così facendo, permette di migliorare la produttività della raccolta eliminando gli spostamenti dell'operatore che possono anche eseguire altre operazioni in attesa che il sistema recuperi l'elemento selezionato.

In un sistema di erogazione automatizzato, i prodotti vengono erogati automaticamente, ma il rifornimento viene comunque eseguito manualmente. Quest'ultima operazione può essere eseguita senza interrompere il processo di prelievo. Un sistema di erogazione automatizzato comune è il **telaio A** (*Figura 5 b*). Questo sistema è costituito da canali di prodotto differenti posizionati in una struttura che ricorda la lettera "A" che creano, così, un tunnel in cui si trova la **cinghia di raccolta**. Gli ordini vengono compilati erogando automaticamente i prodotti corrispondenti in una finestra virtuale sul nastro trasportatore. I telai A sono adatti per grandi ordini di oggetti di piccole dimensioni ed un esempio possono essere le farmacie.

1.4.3 AGV System

AGV è l'acronimo per *Automated Guided Vehicle* e identifica dei veicoli utilizzati principalmente per la movimentazione di prodotti all'interno degli stabilimenti produttivi o dei magazzini. Esistono, comunque, anche veicoli progettati per svolgere le proprie mansioni all'esterno dello stabilimento, ma sono molto meno utilizzati.

Data la grande varietà di prodotti appartenenti a questa famiglia, in letteratura si possono trovare anche differenti acronimi come: *Laser Guided Vehicle* (**LGV**) e *Self Guided Vehicles* (**SGV**). In Germania, la tecnologia assume il nome di *Fahrerlosenv Transport systemen* (**FTS**). Recentemente, inoltre, è stato introdotto il nuovo concetto di *Intelligent Guided Vehicle* (**IGV**) per indicare un nuovo ambito di ricerca relativo a questo tipo di prodotto.

Nell'ambito dei magazzini automatizzati si possono distinguere due tipi di tecnologie basate sui sistemi AGV quali *Movable Rack* o *Static Rack*.

1.4.3.1 Movable Rack - Robotic Mobile Fulfillment Systems (RMF)

Questo sistema è costituito da 3 componenti cioè **le unità di trasmissione robot**, **i pod di inventario** e **le stazioni di lavoro** (vedi

Figura 6). I robot, controllati da un computer centrale, sono in grado di sollevare i *pod*, in italiano scaffali mobili, e li trasportano alle stazioni di lavoro per comporre l'ordine. Il sistema è molto flessibile nella capacità di produzione, in quanto è possibile aggiungere più robot e pod al magazzino. Ciò è

particolarmente importante per i rivenditori di Internet che devono affrontare una domanda volatile.

Ultimamente, si è sviluppato un nuovo metodo per controllare i robot decentralizzando il controllo.

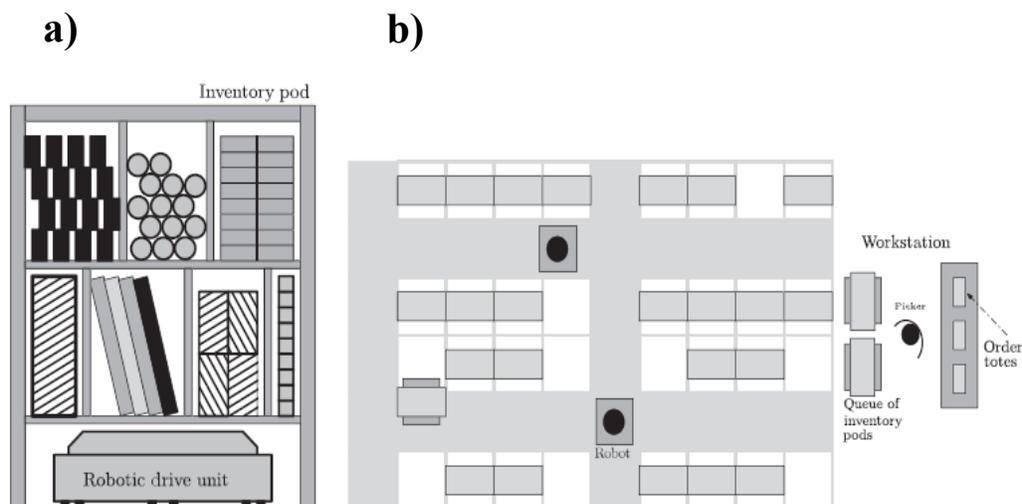


Figura 6 - Rappresentazione Sistema di immagazzinamento RMF:
a) Robot e inventory pod; b) Layout con una workstation.

1.4.3.2 Static Rack: Pick Support AGVs

In questi sistemi, un AGV segue automaticamente il selettore e trasporta dei contenitori e, una volta che quest'ultimo è pieno, l'AGV viene automaticamente scambiato con un nuovo AGV che ne trasporta uno vuoto. Così facendo, il raccogliitore può continuare il percorso di raccolta senza tornare al deposito e l'AGV trasporta automaticamente i contenitori pieni alla postazione di preparazione ordine (Vedi

Figura 7).

Esistono anche altre varianti dove l'AGV passa automaticamente all'ubicazione di prelievo e preleva l'articolo senza alcun aiuto del selettore.



Figura 7 - Rappresentazione di due sistemi AGV.

AUTOMATED VEHICLE STORAGE & RETRIEVAL SYSTEM (AVSRS)

Lo studio relativo a questo capitolo ha avuto come riferimento le argomentazioni contenute in ⁵.

I sistemi di stoccaggio **AVSRS** possono essere considerati come l'evoluzione dei sistemi ASRS e si possono distinguere due differenti logiche che comportano investimenti molto differenti tra di loro.

2.1 Aisle-Based Shuttle System

L'area di stoccaggio in un sistema AVSRS *Aisle-Based* è costituita da una struttura di immagazzinamento su più livelli simile alle classiche scaffalature e avente al centro un corridoio trasversale che li attraversa ortogonalmente. Tuttavia, dal momento che i corridoi di movimentazione devono permettere unicamente il transito degli shuttle e delle UDC, si ha una **maggiore densità di immagazzinamento** rispetto ai magazzini non automatizzati. Per eseguire azioni di stoccaggio e recupero, viene utilizzato un **ascensore** per i movimenti verticali tra i livelli e vengono utilizzati **veicoli autonomi o navette** per i movimenti orizzontali all'interno del livello. Per recuperare una UDC, una navetta si sposta nella posizione dove è stoccata, la carica e si sposta verso l'ascensore per un viaggio verticale. Poi, la navetta o passa l'UDC all'ascensore o utilizza anch'essa l'ascensore per spostare il carico ad un livello inferiore in modo da poter trasferire il carico nella stazione di prelievo tramite nastro trasportatore.

La prima modalità di trasporto verticale è detta *Tier Captive (TC)*, la seconda è definita *Tier to Tier (T2T)*. Secondo la normativa della *FEM*, la nomenclatura di queste due tipologie è differente; una è definita *Pallet Lifter* e l'altra *Shuttle Lifter*.

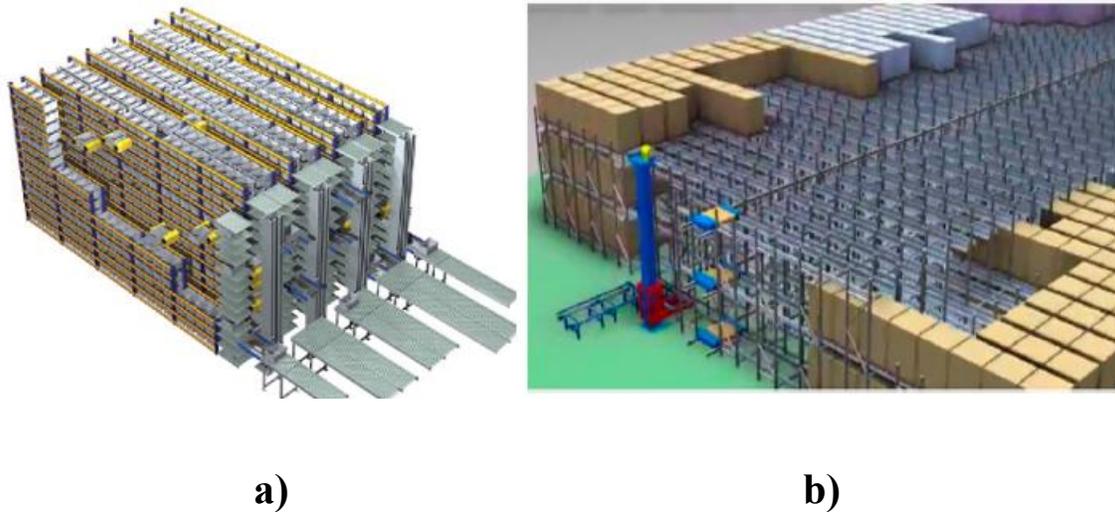


Figura 8 - Rappresentazione di magazzini con sistema AVSRS: a) singola profondità; b) multi profondità.

Inoltre, si possono avere sia più ascensori dedicati per ogni corridoio sia un numero di ascensori minore rispetto al numero di corridoi presenti nel sistema. In questo caso, però, è necessario progettare un sistema che permetta di spostare, in base alle necessità, gli ascensori da un corridoio ad un altro. In ogni caso, i magazzini AVSRS permettono di avere una **maggiore flessibilità** e un **maggiore throughput** rispetto ai sistemi ASRS, nonostante gli investimenti siano simili; utilizzando navette aggiuntive, la capacità del sistema può essere aumentata e rimuovendole, la capacità può essere ridotta.

Studi e ricerche recenti stanno portando ad avere diverse soluzioni robotiche dove le navette, dette appunto *robot*, sono in grado di muoversi non solo orizzontalmente, ma anche di passare da un livello ad un altro sia con un moto verticale sia in diagonale.

Come per i sistemi ASRS, si possono avere magazzini a singola o doppia profondità oppure magazzini a multi profondità, detti anche compatti (

Figura 8). I sistemi di storage compatti basati su gru non hanno flessibilità nei volumi che sono in grado di gestire. I sistemi di stoccaggio multi profondità basati su Shuttle, che utilizzano ascensori al posto delle gru, hanno maggiore flessibilità potendo aggiungere o rimuovere navette. Questi sistemi sono costituiti da più livelli di corsie di stoccaggio multi profondità, ognuno dei quali contiene un tipo di prodotto. I carichi in una corsia vengono gestiti utilizzando un criterio LIFO, a meno che il recupero non sia possibile da lati opposti.

2.2 Grid-Based Shuttle System

Una variante dei sistemi AVSRS sono i sistemi automatizzati in cui le navette si muovono su una **griglia**. In questo caso, le UDC archiviate devono spostarsi, utilizzando delle navette, per raggiungere la posizione assegnatagli o per essere prelevate. Per poter immagazzinare il maggior numero possibile di UDC, è stata sviluppata una logica basata sul **gioco di puzzle di Sam Loyd**, riportato in **Figura 9**.

13	10	11	6
5	7	4	8
1	12	14	9
3	15	2	

Figura 9 - Gioco del 15.

In questo caso le caselle rappresentano una UDC o un contenitore, che viene posizionata in una griglia avente solo un punto di uscita. Questa logica permette di avere una **densità di stoccaggio** $(n-1)/n$, dove n è il numero UDC nella griglia.

Per effettuare l'operazione di prelievo, il sistema sposta ripetutamente le ubiche vuote avvicinando così progressivamente il carico al punto di uscita dal sistema di stoccaggio, come in **Figura 10**:

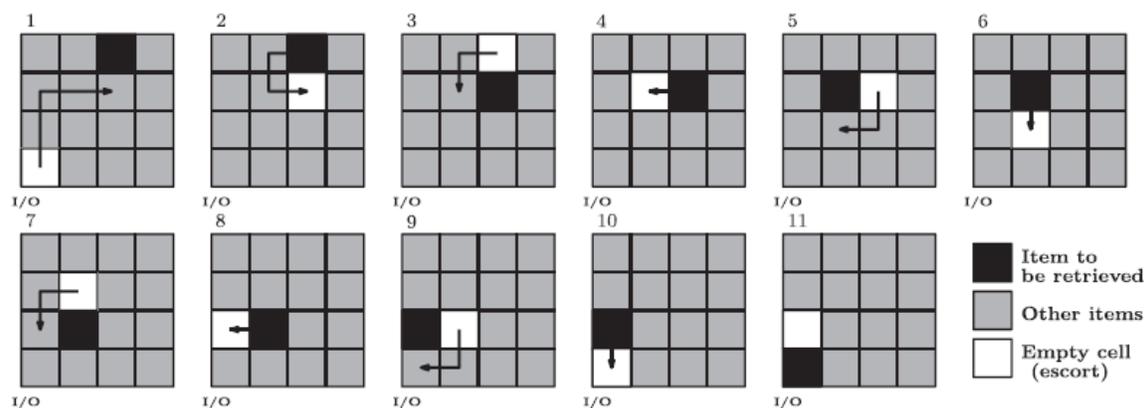


Figura 10 - Esempio di funzione di prelievo in sistema Grid-Based Shuttle.

A partire da questo modello, si sono sviluppate differenti varianti di seguito elencate.

2.2.1 Grid Store

Il sistema è costituito da una **griglia rettangolare di moduli trasportatori quadrati** che possono movimentare dei contenitori nelle **quattro direzioni cardinali**. Sul lato sud, è posizionato un nastro trasportatore che allontana i contenitori dalla griglia. Sul lato nord, invece, è posizionato un nastro trasportatore che porta i contenitori che devono essere stoccati. In **Figura 11** troviamo un esempio di una generica azione di prelievo.

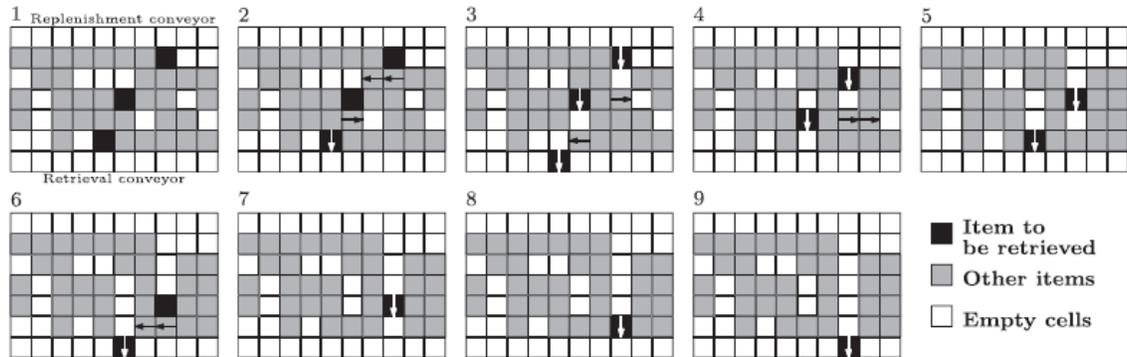


Figura 11 – Esempio di funzionamento in sistema Grid Store.

2.2.2 Grid Pick

La struttura è simile a quella esposta precedentemente ma, a differenza del Grid Store, i contenitori non vengono caricati su un nastro trasportatore, ma vengono movimentati verso un lato del sistema, detto **fronte di prelievo**. A questo punto, un addetto preleva gli articoli dal contenitore e forma così l'ordine su un carrello di prelievo. In **Figura 12** è rappresentato un esempio di funzionamento:

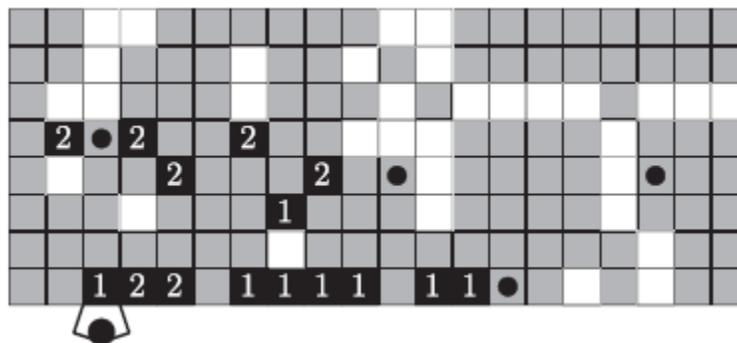


Figura 12 – Esempio di funzionamento di Sistema Grid Pick.

2.2.3 Live-Cube Compact Storage

In questa tecnologia, si ha una struttura su più livelli di altezza, tutti utilizzando la logica del Grid Store. Su un lato, infine, si ha un ascensore che trasporta le UDC dai differenti punti di uscita dei livelli (vedi *Figura 13*). I colori dei vari cubi rappresentano UDC di materiali differenti.

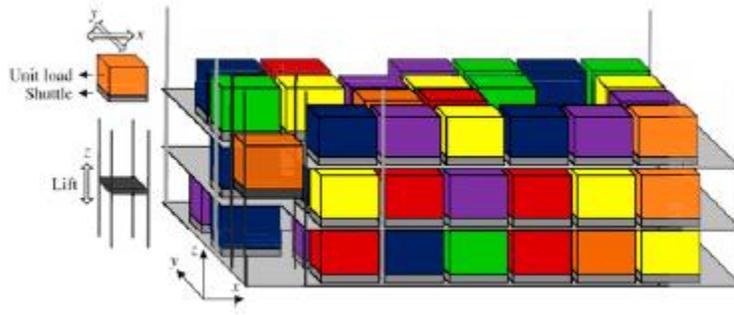


Figura 13 – Esempio di Sistema Live-Cube Compact Storage.

2.2.4 Grid Flow System

In questo caso, al posto dei trasportatori, viene utilizzato un AGV che rende così più flessibile il sistema. Questo, perché le griglie possono assumere qualsiasi forma e permettono di modificare il layout della struttura d'immagazzinamento senza dover effettuare investimenti (vedi *Figura 14*).

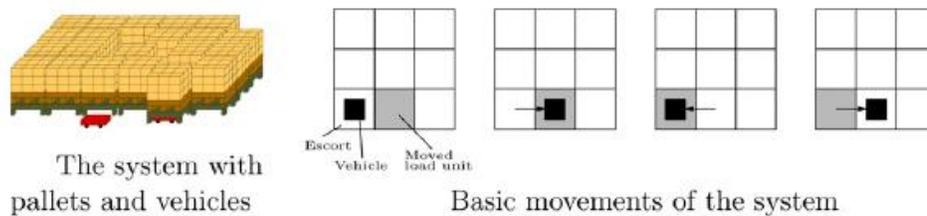


Figura 14 - Esempio di Sistema Grid Flow.

2.2.5 Robot-Based Compact Storage and Retrieval Systems (RCSR)

La struttura di stoccaggio è qui formata da una griglia nella parte superiore di quella in cui sono posizionati dei robot. I canali di immagazzinamento si sviluppano, quindi, in altezza e le stazioni di lavoro sono posizionate alla base della struttura. Questa logica permette di adottare una logica FIFO e i canali possono essere dedicati ad un'unica tipologia di prodotto oppure possono avere differenti varianti (vedi *Figura 15*).

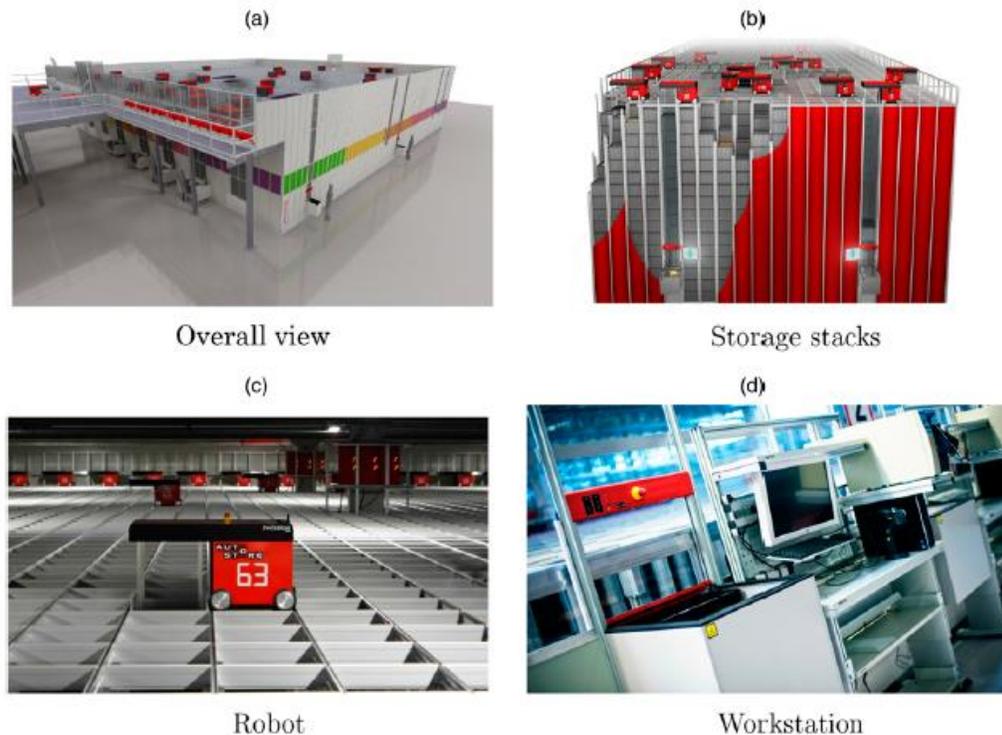


Figura 15 – Esempio di sistemi RCSR: a) vista generale; b) struttura magazzino; c) sistema di movimentazione robotica; d) postazione di lavoro.

2.3 Tempo ciclo per Aisle-Based AVSRS

Il tempo ciclo, t_c , viene definito secondo la FEM come il **valore atteso del tempo necessario per una sequenza di azioni definita e ripetuta costantemente**. Le azioni sono quelle relative al posizionamento o al recupero di un pallet e il ritorno alla posizione iniziale. Quelle più comunemente considerate sono il tempo di viaggio, il carico e lo scarico dell'UDC e varie azioni ausiliarie, come l'attività di commutazione, l'attività di posizionamento antecedente il carico o lo scarico e le comunicazioni del sistema.

Questa definizione risulta chiara e di facile applicazione quando si tratta di cicli semplici, come una singola missione di consegna o di recupero di una UDC; risulta, però, di difficile applicazione in cicli combinati o multipli. Questa difficoltà deriva dall'elevato numero di combinazioni di azioni e processi possibili il quale rende pressoché impossibile la determinazione dei differenti parametri in maniera accurata.

Oltre alla difficoltà implicita nel calcolo del tempo ciclo per cicli multipli, sorge un ulteriore problema legato alla normativa che non fornisce nessuna informazione riguardo i tempi di attesa dei vari sistemi di movimentazione; nel caso specifico, l'attesa dello Shuttle nei confronti dell'ascensore. Per ovviare a questo problema, la normativa si limita a calcolare gli indici in maniera separata, come se non appartenessero ad un unico sistema.

Questo indice è stato progettato per permettere un paragone tra le **prestazioni nominali del magazzino** e le **prestazioni reali**. Per la propria natura, quindi non è un indice che permette facilmente il confronto tra differenti tipologie di magazzino. Una proposta ottimale per risolvere questo problema è quella di utilizzare una variante dell'indice di *throughput* come metro di paragone al posto del tempo ciclo.

In ⁶ sono presenti riferimenti e approfondimenti sul tema.

2.4 Stato dell'arte

In letteratura, i primi lavori di ricerca che trattano l'argomento dei sistemi AVS/RS sono stati pubblicati nei primi anni 2000. In particolare, il primo è ad opera di Malmborg (2002)⁷ dove viene presentata una classificazione tra sistemi Tier-to-Tier e Tier-to-Captive e, inoltre, un modello analitico per valutare possibili configurazioni dei sistemi basandosi sulla tipologia dei rack e sulle caratteristiche specifiche dei veicoli. I parametri considerati sono i veicoli utilizzati, la durata di un ciclo e la velocità effettiva del sistema. Più tardi, Malmborg ⁸ sviluppò anche un modello matematico per valutare la proporzione ottimale tra cicli singoli e cicli doppi da effettuare considerando le richieste di operazioni di stoccaggio o di recupero. Un altro approccio studiato si basa sulla teoria delle code sviluppato da Kuo et al.⁹, il quale si è concentrato sull'analisi e lo sviluppo di un modello capace di stimare, su un ciclo singolo, il tempo ciclo e il tempo di utilizzo dei veicoli Fukunari e Malmborg¹⁰, arricchiscono il modello tenendo conto della capacità di accoppiamento di operazioni di stoccaggio e di recupero per migliorare le prestazioni dell'intero sistema riducendo al massimo il costo computazionale del modello¹¹. Zhang et al.¹² analizzano sia la media, sia la varianza del tempo ciclo un modello con arrivi non Poissoniani e propone tecniche di approssimazione per semplificare il modello analitico. Roy et al.¹³ modella il lift e gli altri veicoli attraverso un approccio di reti di code semi aperte che interagiscono indipendentemente tra loro. Questa metodologia ha portato subito alla modellizzazione di cicli singoli e, solo successivamente, è stata estesa ed applicata anche per cicli doppi o multipli^{14 15}. Epp et al.¹⁶ adotta, invece, un modello di reti di code aperte per studiare le caratteristiche e le prestazioni dei magazzini mono profondità e con sistemi pallet Lifter. Ekrenand Heragu¹⁷ svilupparono una regressione, basata su un modello di simulazione, per stimare il tempo ciclo medio come funzione della tipologia del ubic e le caratteristiche dei veicoli. Ekren pubblicò, quindi, dei modelli di simulazione che permettessero di comparare differenti configurazioni di magazzini e i rispettivi costi facilitando e supportando, così, il lavoro dei progettisti. Successivamente, Marchet et al.¹⁸ propone un approccio fondato sulle reti di code e tecniche analitiche con l'obiettivo di stimare il tempo ciclo come somma di tempi di percorrenza e tempi d'attesa. Lerher et al.¹⁹ introdusse, inoltre, un modello analitico che permette di stimare la durata media di un ciclo singolo o doppio in sistemi mono profondità. Anche in questo caso venne poi ampliato il modello prendendo in considerazione anche magazzini a doppia profondità²⁰ e, inoltre, configurazioni dove i veicoli lift possono cambiare canale di esercizio²¹. Ekren et al.²² sviluppò un modello matematico per la stima della media e varianza dei tempi cicli ed il consumo medio energetico. Poco prima Borovinsek et al.²³

presentò un metodo di ottimizzazione dei consumi energetici, dei costi totali e del throughput. Un altro metodo di simulazione è stato proposto da Ning et al.²⁴ per valutare le performance di sistemi pallet Lifter con più lift in cicli singoli. Anche Lerher et al.²⁵ sviluppò un modello di simulazione per la stima delle performance degli stessi sistemi di immagazzinamento precedenti ma, inoltre, ne studia le correlazioni tra tempo di percorrenza e throughput²⁶. Ekren²⁷ presentò uno studio tramite soluzioni grafiche per il design dei sistemi di immagazzinamento. Nel mentre Ha and Chae²⁸ pubblicarono un metodo, basato sullo studio della stima dei tempi di percorrenza, per determinare il numero ottimale di shuttle da utilizzare all'interno di un magazzino. Tappia et al.²⁹ propose un approccio basato sulle reti di code per stimare le performance dei sistemi di immagazzinamento con Shuttle. Tutti gli articoli fino a qui citati, però, non considerano nei propri studi magazzini che effettuano cicli multipli. Il primo lavoro a prendere in considerazione anche questo particolare fu Manzini et al.³⁰ nel 2016. Oltre a questo aspetto, in tutti i casi precedenti non vengono considerate le logiche di immagazzinamento e viene assunta a prescindere una logica randomica. Ekren et al.³¹ dimostrò che le logiche di immagazzinamento influenzano significativamente le performance del sistema. Infine, D'Antonio et al.³² pubblicò due lavori con l'obiettivo di proporre un approccio analitico in grado di fornire la stima delle performance di sistemi AVS/RS multi profondità considerando anche le logiche di immagazzinamento definendole come distribuzioni di probabilità. L'ultimo lavoro pubblicato prima di questo presente è stato pubblicato a febbraio di quest'anno da Ekren³³ dove vengono implementate nel modello energetico altre variabili quali la decelerazione dei macchinari differente dall'accelerazione e inoltre, per la prima volta, viene considerata la presenza di freni rigenerativi all'interno del sistema.

MODELLO ENERGETICO

Alla base di questo modello, ci sono le fonti studiate nel precedente *capitolo 2.4*.

Per lo studio del modello energetico, è stato preso in considerazione un generico magazzino con sistema di stoccaggio AVSRS. Bisogna considerare che, all'interno di ogni veicolo, sono presenti tutti gli equipaggiamenti necessari per svolgere le operazioni di azionamento, di controllo, di alimentazione e stoccaggio dell'energia. Solitamente, lo Shuttle è dotato di 4 ruote e si muove su di una rete di rotaie che permettono il movimento anche dei Satelliti all'interno dei canali.

Esistono varianti che si possono applicare al sistema, quali:

- **Ascensore con dispositivo per la movimentazione di carichi multipli:** ciò significa che più di una UDC, solitamente tra le 2 e le 4 unità, possono essere spostate contemporaneamente.
- **Shuttle con ruote girevoli o con un carrello laterale:** in questo modo, i veicoli navetta possono anche cambiare corridoi all'interno del sistema.

Generalmente, sono presenti più veicoli all'interno del sistema per permettere così di compiere simultaneamente operazioni di stoccaggio e prelievo e, inoltre, questa configurazione permette un'elevata flessibilità di adeguamento alla velocità e al volume di UDC da stoccare.

Il modello energetico da me proposto prende spunto dai modelli precedentemente proposti da *Ekren* e presenta un piccolo aspetto aggiuntivo, cioè la differenziazione dei consumi tra moto ascendente e discendente.

Nella **APPENDICE A** è presente una tabella che permette di confrontare i due modelli.

3.1 Caratterizzazione assi di movimentazione

Seguendo le linee-guida della FEM, sono stati modellizzati gli spostamenti sui vari assi che abbiamo definito come in *Figura 16*.

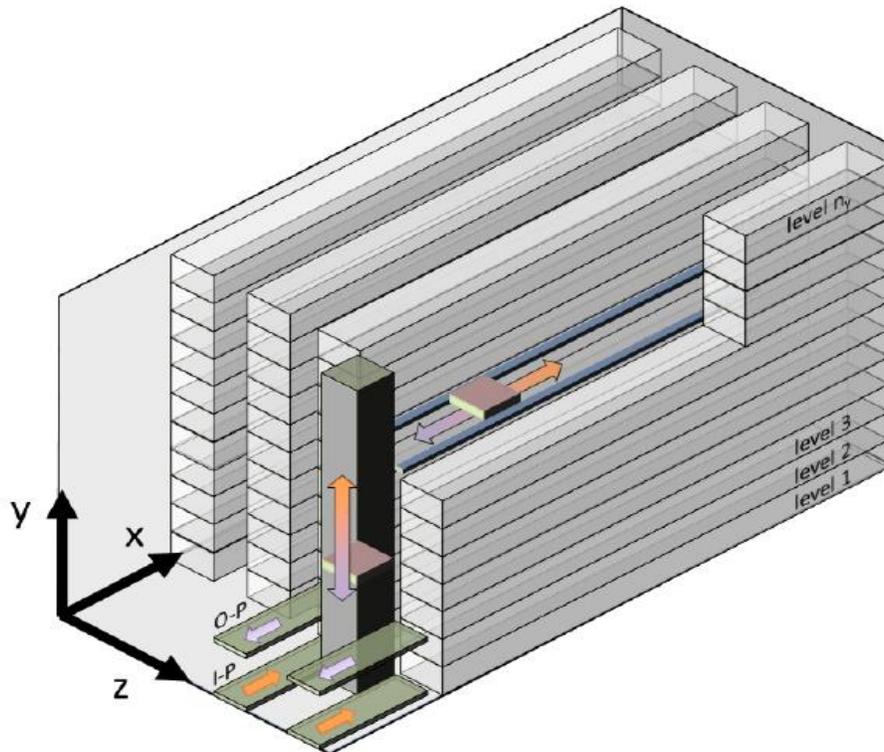


Figura 16 – Raffigurazione degli assi di movimentazione.

Il concetto base è quello di suddividere un'operazione di prelievo o di stoccaggio nei vari spostamenti singoli lungo gli assi e calcolarne, quindi, le caratteristiche relative alla **cinematica** e al **consumo energetico**.

- **Asse Y:** è quello rappresentativo del moto verticale compiuto dagli ascensori tra i vari livelli.
- **Asse X:** è quello rappresentativo del moto orizzontale compiuto dagli Shuttle lungo il *rack*.
- **Asse Z:** è quello rappresentativo del moto orizzontale compiuto dai satelliti in profondità all'interno di una corsia di stoccaggio.

Durante un'operazione di stoccaggio, le UDC vengono trasportate dall'area di ricevimento merci all'area di stoccaggio e vengono posizionate nell'**I-P**. Da lì, vengono prese in carico dall'ascensore e, successivamente, da uno Shuttle per poi essere posizionate tramite il satellite nell'ubica assegnatagli. Durante un'operazione di prelievo, invece, il satellite, una volta raggiunta l'ubica, caricherà l'UDC per poi raggiungere lo Shuttle che arriverà all'ascensore e la porterà all'**O-P**.

Come già detto in precedenza, si possono distinguere **due tipi di tecnologie**: nella prima, gli ascensori si occupano del trasporto delle UDC e, in questo caso, è necessario predisporre uno Shuttle per ogni livello; nella seconda, gli ascensori trasportano gli Shuttle che hanno già caricato le UDC, permettendo così di ridurre il numero di Shuttle utilizzati (vedi **Figura 17**).

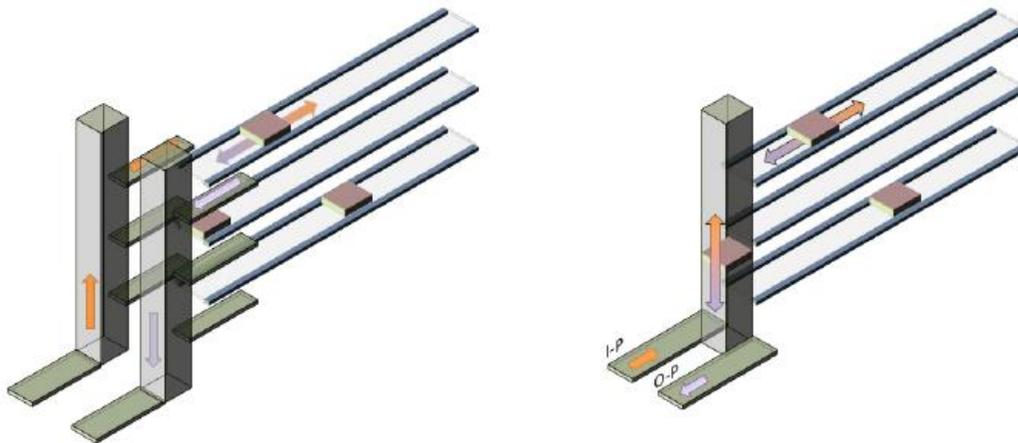


Figura 17 – Rappresentazione di due sistemi: a sinistra, Pallet Lifter; a destra, Shuttle Lifter.

3.2 Caratteristiche cinematiche del moto

In generale, un qualsiasi spostamento di un macchinario da un punto ad un altro può avere tre differenti fasi:

- **Moto accelerato**
- **Moto a velocità costante**
- **Moto decelerato**

Le fasi di accelerazione e decelerazione possono avvenire in maniera non costante ed è possibile tracciare un grafico dell'andamento, rispetto al **tempo** della **distanza percorsa** e della **velocità del macchinario**. Riporto in *Figura 18* un esempio:

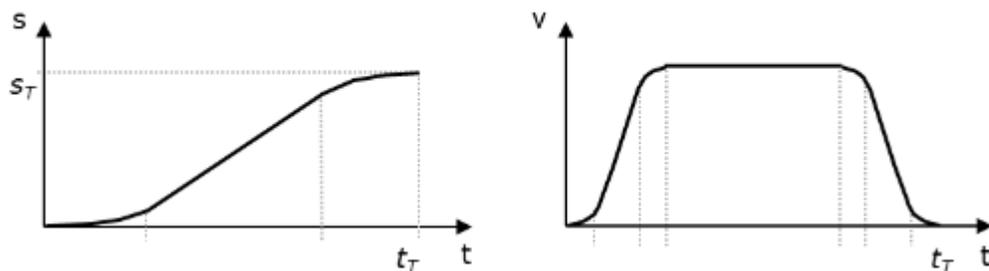


Figura 18 – Grafici di profili di velocità, nel caso reale.

Come si può notare dalla figura precedente, il **profilo di velocità** è rappresentabile tramite **due fasi transitorie**, quelle di accelerazione e decelerazione, più una **fase costante**. Per semplificarne il calcolo, noi considereremo, come avviene in generale nella letteratura e come indica la FEM, le accelerazioni e decelerazioni costanti in modo da poter eliminare le fasi transitorie ed ottenere di conseguenza il seguente profilo di velocità (**Figura 19**):

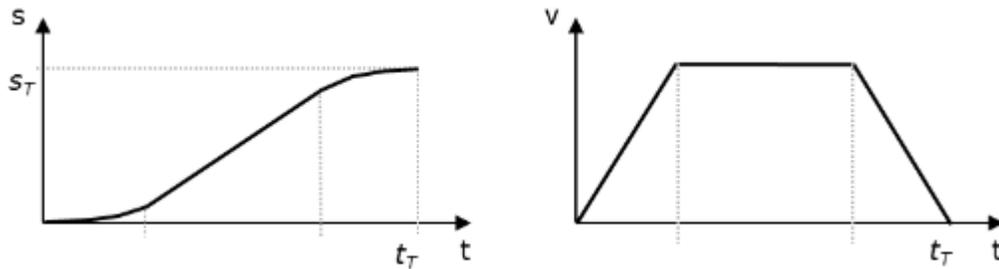


Figura 19 – Grafici di profili di velocità, secondo nostre assunzioni.

Nel caso in cui il macchinario non raggiunga la velocità massima poiché la distanza da percorrere non si rivela sufficiente, non avremo, di conseguenza, la fase di moto a velocità costante, ma otterremo, quindi, i seguenti grafici (**Figura 20**) riguardanti la distanza percorsa e il profilo di velocità.

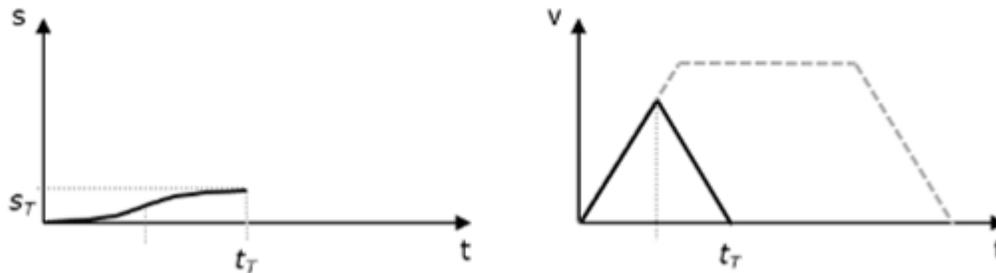


Figura 20 – Grafici di profili di velocità, in caso di non raggiungimento della velocità massima.

A questo punto, è possibile calcolare i tempi di utilizzo del macchinario sui differenti assi. Svolgeremo i conti unicamente per l'asse **x**, dal momento che le formule non variano al variare degli assi.

È stata utilizzata la **legge oraria del moto** per poter definire alcune variabili fondamentali per il calcolo del consumo energetico quali il **tempo di utilizzo del sistema** e la **velocità massima raggiunta**.

$$s = s_0 + v_0 \cdot t \pm \frac{1}{2} at^2 \quad 7)$$

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} \quad 8)$$

Prima di tutto, definiamo $t_{x,a}$ e $t_{x,d}$ come il tempo di accelerazione e decelerazione. Come primo caso, consideriamo quello in cui lo spostamento sia abbastanza grande da garantire al macchinario la possibilità di raggiungere la velocità massima. Otteniamo, quindi, i tempi necessari per raggiungere la velocità massima settata e il tempo necessario per arrestarsi da tale velocità:

$$t_{x,a} = \frac{v_{x,set}}{a_x} \quad 9)$$

$$t_{x,d} = \frac{v_{x,set}}{d_x} \quad 10)$$

Una volta determinate queste variabili, possiamo calcolare le distanze che percorrono i macchinari in questi lassi di tempo, definendole $s_{x,a,set}$ e $s_{x,d,set}$. La somma di questi due spazi darà come risultato $s_{x,set}$, cioè la variabile limite che permetterà di sapere se verrà raggiunta la velocità massima:

$$s_{x,a,set} = \frac{1}{2} \cdot a_x \cdot t_{x,a}^2 \quad 11)$$

$$s_{x,d,set} = v_{x,set} \cdot t_{x,d} - \frac{1}{2} \cdot d_x \cdot t_{x,d}^2 \quad 12)$$

$$s_{x,set} = s_{x,a,set} + s_{x,d,set} \quad 13)$$

A questo punto, è possibile anche calcolare il tempo in cui il macchinario viaggia a velocità costante, $t_{x,c}$:

$$t_{x,c} = \frac{s_x - s_{x,set}}{v_{x,set}} \quad 14)$$

Quando $s_x > s_{x,set}$, è necessario calcolare i tempi con delle formule differenti.

Partiamo, quindi, dalla definizione del generico tempo di accelerazione e decelerazione:

$$t_{x,a} = \frac{v_{x,get}}{a_x} \quad 15)$$

$$t_{x,d} = \frac{v_{x,get}}{d_x} \quad 16)$$

Essendo entrambe le funzioni dipendenti da $v_{x,get}$, che è un'incognita, possiamo trovare la seguente relazione tra $t_{x,acc}$ e $t_{x,dec}$:

$$t_{x,d} = t_{x,a} \cdot \frac{a_x}{d_x} \quad 17)$$

Inoltre, sappiamo che, dato che il macchinario non raggiunge la velocità massima e, dunque, non sarà presente la fase di moto a velocità costante, lo spazio da percorrere, s_x , sarà la somma dello spazio percorso nelle fasi di accelerazione e decelerazione. Riutilizzando la **formula 7**, possiamo calcolare, quindi, tali spazi, che definiamo come $s_{x,a}$ e $s_{x,d}$, ponendo quest'ultima in funzione del tempo di accelerazione tramite l'utilizzo della **formula 17**:

$$s_x = s_{x,a} + s_{x,d} \quad 18)$$

$$s_{x,a} = \frac{1}{2} \cdot a_x \cdot t_{x,a}^2 \quad 19)$$

$$s_{x,d} = \frac{1}{2} \cdot \frac{a_x^2}{d_x} \cdot t_{x,a}^2 \quad 20)$$

Sostituendo le *formule 18* e *19* all'interno della *formula 20*, ne risulta che:

$$t_{x,a} = \sqrt{\frac{s_x}{\frac{a_x}{2} + \frac{a_x^2}{2d_x}}} \quad (21)$$

Una volta risultato $t_{x,a}$, possiamo calcolare $t_{x,d}$, utilizzando la *formula 17* e, inoltre, possiamo definire $v_{x,get}$ invertendo la *formula 13* come:

$$v_{x,get} = a_x * t_{x,a} \quad (22)$$

È ora possibile calcolare il tempo totale di utilizzo del macchinario in quanto somma dei tempi delle varie fasi, ottenendo di conseguenza:

$$t_x = t_{x,a} + t_{x,c} + t_{x,d} \quad (23)$$

Di seguito, la *Figura 21* presenta in maniera grafica tutte le differenti formule per i vari casi.

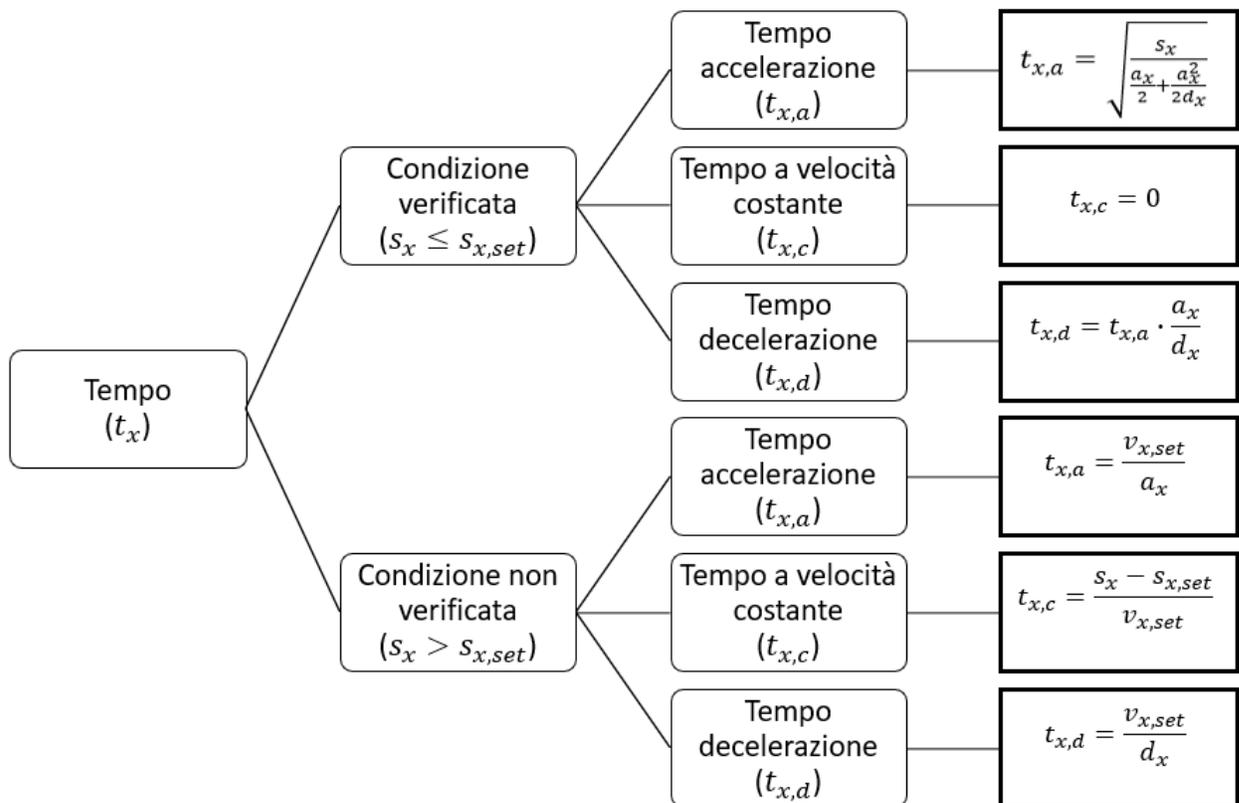


Figura 21 – Grafico riassuntivo delle formule coinvolte nel modello cinematico.

3.3 Calcolo delle potenze specifiche

Dopo aver definito le caratteristiche cinematiche del modello, si può procedere con lo studio delle **potenze specifiche** per poter successivamente calcolare i **consumi energetici finali** che implicano tali spostamenti.

Verranno, quindi, analizzati i fabbisogni energetici calcolando, in prima istanza, le potenze specifiche per ogni fase dello spostamento sui vari assi e differenziando tra ascendente e discendente nel caso del moto sull'asse verticale. Oltre ai consumi per gli spostamenti, bisognerà sommare i consumi legati alla presa in carico e scarico del pallet da parte dei macchinari.

Nella seguente **Figura 22** è presente uno schema che rappresenta vettorialmente tutte le forze considerate e permette, quindi, di spiegare i vari segni algebrici:

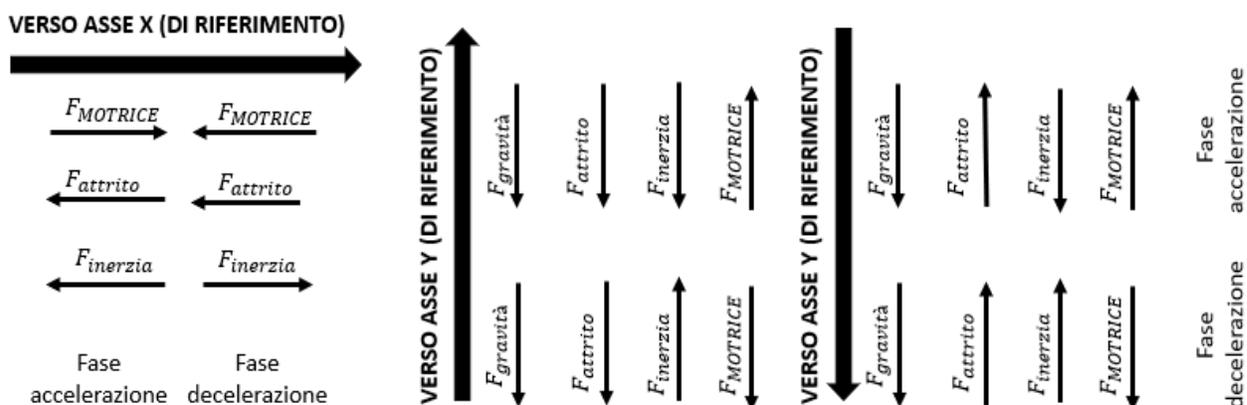


Figura 22 – Raffigurazione delle forze vettoriali presenti nel moto.

3.3.1 Consumi relativi agli spostamenti

All'interno del modello energetico, la distinzione dei tre assi, ai fini del calcolo delle potenze specifiche, non è più necessaria. Basta, perciò, differenziare piano orizzontale e piano verticale. Questo, perché le forze applicate sul corpo, nel nostro caso sul macchinario, variano in base alla **retta d'azione** che può essere orizzontale oppure verticale.

3.3.1.1 Potenze specifiche per moto orizzontale

Per gli spostamenti lungo gli assi x e z, in entrambi i casi, il moto è sul piano orizzontale, quindi utilizzeremo le stesse formule.

Definiamo le varie potenze specifiche sull'asse x come:

$$p_{x,a} = (a_x \cdot f_r + g \cdot c_{r,x}) \frac{v_{x,get}}{\eta_x} \quad 24)$$

$$p_{x,c} = (g \cdot c_{r,x}) \frac{v_{x,get}}{\eta_x} \quad 25)$$

$$p_{x,d} = (d_x \cdot f_r - g \cdot c_{r,x}) \frac{v_{x,get}}{\eta_x} \quad 26)$$

dove, a_x e d_x rappresentano l'accelerazione e la decelerazione del macchinario; f_r è il fattore di resistenza della massa dovuta a variazioni di velocità; g è l'accelerazione gravitazionale; $c_{r,x}$ rappresenta il coefficiente d'attrito. Inoltre, è presente un coefficiente di rendimento di trasmissione η_x che può essere inteso anche come fattore rappresentativo del tipo di tecnologia utilizzata.

Per quanto riguarda l'asse z, il macchinario può essere o un satellite oppure delle forche telescopiche. Con entrambe le tecnologie è stato utilizzato lo stesso modello. Ciò deriva dall'assunzione che il tipo di moto sia paragonabile, nonostante sia effettuato con tecnologie differenti. Naturalmente, i valori delle potenze specifiche saranno distinguibili in base al tipo di tecnologia, poiché i dati di input relativi a velocità, accelerazioni, decelerazioni e distanze da percorrere saranno diversi.

In conclusione, si otterranno dei valori di $v_{z,get}$ variegati e, inoltre, sarà possibile differenziare le tecnologie, utilizzando diversi valori per quanto riguarda il rendimento di trasmissione η_z .

3.3.1.2 Potenze specifiche per moto verticale

Nel caso degli spostamenti lungo l'asse y , è stata fatta una distinzione basata sul moto, ascendente o discendente. Questo, perché, se i punti di I-P e O-P non coincidono, si hanno differenti consumi energetici e, perciò, l'approssimazione effettuata nel porre i consumi uguali nei due tipi di moto non risulta più corretta.

Possiamo, quindi, ora definire le varie potenze specifiche con le seguenti formule:

$$p_{y,a,U} = (a_y \cdot f_r + g + g \cdot c_{r,y}) \frac{V_{y,get}}{\eta_y} \quad (27)$$

$$p_{y,c,U} = (g + g \cdot c_{r,y}) \frac{V_{y,get}}{\eta_y} \quad (28)$$

$$p_{y,d,U} = (-d_y \cdot f_r + g + g \cdot c_{r,y}) \cdot \frac{V_{y,get}}{\eta_y} \quad (29)$$

$$p_{y,a,D} = (-a_y \cdot f_r + g - g \cdot c_{r,y}) \cdot \frac{V_{y,get}}{\eta_y} \quad (30)$$

$$p_{y,c,D} = (g - g \cdot c_{r,y}) \cdot \frac{V_{y,get}}{\eta_y} \quad (31)$$

$$p_{y,d,D} = (d_y \cdot f_r + g - g \cdot c_{r,y}) \cdot \frac{V_{y,get}}{\eta_y} \quad (32)$$

in cui, a_y e d_y rappresentano rispettivamente l'accelerazione e la decelerazione del macchinario; f_r è il fattore di resistenza della massa, dovuta a variazioni di velocità; g è l'accelerazione gravitazionale e $c_{r,y}$ rappresenta il coefficiente d'attrito.

In questo caso, però, la forza che genera l'attrito è differente rispetto al moto sul piano orizzontale e si assume, per semplicità, che sia pari alla forza peso.

Inoltre, è presente, anche in questo caso, un coefficiente di rendimento di trasmissione η_y che può essere inteso anche come fattore rappresentativo del tipo di tecnologia coinvolta.

Nel grafico seguente in **Figura 23**, sono riassunte tutte le formule utilizzate nel calcolo delle potenze specifiche:

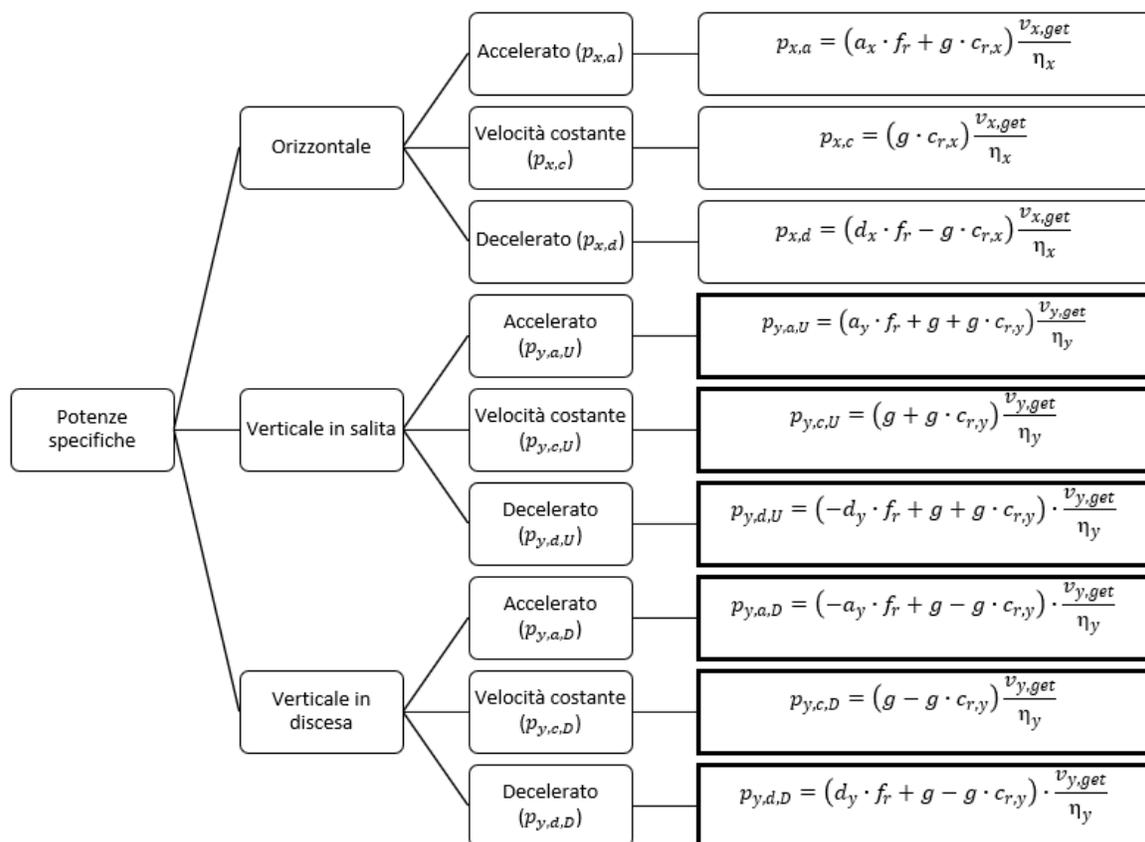


Figura 23 – Grafico riassuntivo delle formule coinvolte nel modello energetico.

3.3.2 Consumi relativi alle prese in carico delle UDC

Sia nel caso in cui sull'asse z vengano utilizzati satelliti sia nel caso in cui vengano utilizzate delle forche telescopiche, sarà necessario sollevare il pallet per poterlo movimentare.

Per calcolare i consumi energetici del sistema di sollevamento, è stato adottato un modello differente perché le distanze e le velocità in gioco risultano minime.

Di conseguenza, è stata utilizzata la **legge dell'energia potenziale**. In questo caso, quindi, non verrà calcolata una potenza specifica, ma direttamente l'energia consumata per compiere tale spostamento, che sarà pari a:

$$\bar{E}_U = m_U * g * \bar{h} \quad 33)$$

dove, m_U è la massa del carico; g l'accelerazione gravitazionale e h rappresenta la corsa di sollevamento (di solito 4,5 / 5 cm).

3.4 Calcolo dell'Energia

Una volta calcolati tutti i parametri relativi alle potenze specifiche e alle caratteristiche cinematiche del moto, è possibile calcolare il **consumo energetico** moltiplicando le potenze per i tempi di utilizzo e le masse movimentate.

Posso, quindi, definire le variabili relative ai consumi energetici specifici calcolati per un generico spostamento come:

$$e_x(x) = p_{x,a} \cdot t_{x,a} + p_{x,c} \cdot t_{x,c} + p_{x,d} \cdot t_{x,d} \quad 34)$$

$$e_{y,U}(y) = p_{y,a,U} \cdot t_{y,a} + p_{y,c,U} \cdot t_{y,c} + p_{y,d,U} \cdot t_{y,d} \quad 35)$$

$$e_{y,D}(y) = p_{y,a,D} \cdot t_{y,a} + p_{y,c,D} \cdot t_{y,c} + p_{y,d,D} \cdot t_{y,d} \quad 36)$$

$$e_z(z) = p_{z,a} \cdot t_{z,a} + p_{z,c} \cdot t_{z,c} + p_{z,d} \cdot t_{z,d} \quad 37)$$

Questo modello permette, pertanto, la valutazione del consumo energetico di un macchinario su un generico percorso, ma non permette una valutazione dei consumi di un magazzino generico.

Per poter fare ciò, verrà presentato, nel capitolo successivo, un modello analitico che, integrato con le equazioni del modello energetico, permetterà una valutazione completa dei consumi di un magazzino.

MODELLO ANALITICO PER IL CONSUMO ENERGETICO ATTESO IN AVSRS

Il modello presentato nel capitolo precedente permette di stimare il consumo energetico risultante dall'utilizzo dei sistemi AVSRS all'interno di un magazzino per ogni singola movimentazione. Per poter avere, quindi, una stima del consumo globale del magazzino è necessario valutare il consumo atteso, completando il modello energetico con il **modello analitico** che stima gli spostamenti attesi all'interno di esso.

4.1 Calcolo degli spostamenti medi sui vari assi

Gli spostamenti compiuti dai macchinari possono essere di 3 tipi:

- dalla **baia di carico** al **livello/canale/ubica generico** dove stoccare/passare di consegna ad un altro macchinario l'UDC;
- dall'**ubica/canale/livello generico** dove è posizionata/prelevata l'UDC alla **baia di scarico**;
- da un **livello/canale/ubica generico ad un altro**. Questo spostamento è definito *switch* ed è presente solo in caso di ciclo doppi o multipli.

Partiamo dalla definizione di questi tre tipi di spostamenti per l'asse y e le quali regole varranno anche per gli altri assi, utilizzando, naturalmente, i coefficienti e le variabili relative a quel determinato asse di spostamento. Unica differenza sarà nella sommatoria di q dove il valore di q dovrà essere considerato da 1 a i e k senza considerare il -1. Questo deriva dal fatto che l'ascensore parte da dentro il sistema al livello 0 e non al di fuori come nel caso degli altri macchinari.

4.1.1 Spostamento medio da baia di carico a livello generico j

Definiamo, quindi, $\bar{s}_{y,INLIV}$ come lo spostamento medio atteso dalla baia di carico ad un generico livello, che viene calcolato nel modo seguente:

$$\bar{s}_{y,INLIV} = \sum_{j=1}^{N_y} \pi_j \left| y_{IN} - \sum_{q=1}^{j-1} h(q) \right| \quad (38)$$

dove π_j rappresenta la probabilità di dover utilizzare un generico livello j ; y_{IN} mostra la distanza in metri dall'origine del sistema di riferimento della baia di carico e $h(q)$ l'altezza dell'ubica.

4.1.2 Spostamento medio da livello generico j a baia di scarico

Lo stesso ragionamento è da applicare nel secondo tipo di spostamento definendo, $\bar{s}_{y,LIVOUT}$ come lo spostamento medio atteso dal livello generico j alla baia di scarico e calcolarlo come:

$$\bar{s}_{y,LIVOUT} = \sum_{j=1}^{N_y} \pi_j \left| y_{OUT} - \sum_{q=1}^{j-1} h(q) \right| \quad (39)$$

dove π_j rappresenta la probabilità di iniziare il moto da un generico livello j ; y_{OUT} la distanza in metri dall'origine del sistema di riferimento della baia di scarico e $h(q)$ l'altezza dell'ubica.

4.1.3 Spostamento medio da generico livello j_1 a generico livello j_2

Infine, definiamo $\bar{s}_{y,LIVLIV}$ lo spostamento medio atteso per uno switch e lo calcoliamo come:

$$\bar{s}_{y,LIVLIV} = \sum_{j_1=1}^{N_y} \pi_{j_1} \sum_{j_2}^{N_y} \pi_{j_2} \left| \sum_{q=1}^{j_1-1} h(q) - \sum_{q=1}^{j_2-1} h(q) \right| \quad (40)$$

dove π_{j_1} rappresenta la probabilità di iniziare il moto da un generico livello j_1 ; π_{j_2} rappresenta la probabilità di dover raggiungere un generico livello j_2 e $h(q)$ l'altezza dell'ubica.

4.2 Calcolo probabilità tipo di moto: ascendente o discendente

Questa parte del modello analitico è specifica per l'asse y in quanto l'unico ad avere una differenza a livello di consumo energetico in base al verso del moto sull'asse. Diventa, per cui, necessario calcolare la probabilità di utilizzo del macchinario in un verso piuttosto che nell'altro. Le probabilità, inoltre, devono essere calcolate per ogni tipo di moto.

Considerando che, come dati di input, si hanno le distanze dall'origine dei punti di IN e OUT del sistema, questo rende il calcolo delle probabilità più difficile. Per ovviare a questo problema, definiamo n_{IN} e n_{OUT} come approssimazioni del livello in cui sono posizionate le baie di carico e scarico e le calcoliamo utilizzando le seguenti formule:

$$n_{IN} = j \xrightarrow{INF} 1 - N_y \left\{ j : \sum_{q=1}^j h(q) \geq y_{IN} \right\} \quad (41)$$

$$n_{OUT} = j \xrightarrow{INF} 1 - N_y \left\{ j : \sum_{q=1}^j h(q) \geq y_{OUT} \right\} \quad (42)$$

A questo punto è possibile definire le probabilità di compiere uno spostamento nel verso discendente, in base ai tipi di spostamento, come:

$$\pi_{y,D,INLIV} = \frac{n_{IN}}{N_y} \quad (43)$$

$$\pi_{y,D,LIVOUT} = \frac{n_{OUT}}{N_y} \quad (44)$$

$$\pi_{y,D,LIVLIV} = \sum_{j=1}^{N_y} \pi_j \frac{j-1}{N_y} \quad (45)$$

4.3 Calcolo del consumo energetico medio nel caso di ciclo singolo o doppio

Una volta definiti gli spostamenti generici e le probabilità relative al tipo di moto sull'asse Y, per poter rendere la formula più leggera alla lettura, definiamo l'energia per uno spostamento medio sull'asse Y, nei tre seguenti modi:

$$\bar{e}_y(\bar{s}_{y,INLIV}) = [\pi_{y,D,INLIV} \cdot e_{y,D}(\bar{s}_{y,INLIV}) + (1 - \pi_{y,D,INLIV}) \cdot e_{y,U}(\bar{s}_{y,INLIV})] \quad 46)$$

$$\bar{e}_y(\bar{s}_{y,LIVLIV}) = [\pi_{y,D,LIVLIV} \cdot e_{y,D}(\bar{s}_{y,LIVLIV}) + (1 - \pi_{y,D,LIVLIV}) \cdot e_{y,U}(\bar{s}_{y,LIVLIV})] \quad 47)$$

$$\bar{e}_y(\bar{s}_{y,LIVOUT}) = [\pi_{y,D,LIVOUT} \cdot e_{y,D}(\bar{s}_{y,LIVOUT}) + (1 - \pi_{y,D,LIVOUT}) \cdot e_{y,U}(\bar{s}_{y,LIVOUT})] \quad 48)$$

Oltre a ciò dobbiamo definire anche U_{TOT} ed S :

$$U_{TOT} = U_{IN} + U_{OUT} \leq 2 \quad 49)$$

U_{TOT} , cioè il numero di UDC movimentate in totale durante il ciclo. Viene impostato come ≤ 2 poiché, nel ciclo singolo o doppio, considero che l'ascensore abbia capacità di carico pari a 1.

$S (I,O,C)$ rappresenta, invece, il numero medio di *switch* che avvengono nel ciclo sullo stesso piano orizzontale. È una variabile che dipende dal numero di operazioni di stoccaggio e di prelievo che devo effettuare nel ciclo e dalla capacità di carico del *lift*.

Uno *switch* avviene quando, all'interno del ciclo, bisogna compiere un'operazione di stoccaggio e subito dopo una di prelievo; in questa particolare condizione, lo *shuttle* può ottimizzare i propri spostamenti, evitando di tornare nella propria baia di input, e muovendosi direttamente dal canale dove è avvenuta l'operazione di stoccaggio a quello dove bisogna compiere l'operazione di prelievo. Nel caso di ciclo singolo, lo *switch* non può avvenire, mentre, nel caso di ciclo doppio, S viene posto pari a 0,5.

ENERGIA ASSE X

$$\bar{E}_x = e_x(\bar{s}_{x,INCAN}) \cdot (m_x + m_z + m_U U_{IN}) + e_x(\bar{s}_{x,CANOUT}) \cdot (m_x + m_z + m_U U_{OUT}) + (U_{TOT} - 1) \cdot [S \sum_{j=1}^{N_y} \pi_j^2 e_x(\bar{s}_{x,CANCAN}) \cdot (m_x + m_z) + (1 - \sum_{j=1}^{N_y} \pi_j^2) \cdot (e_x(\bar{s}_{x,INCAN}) + e_x(\bar{s}_{x,CANOUT})) \cdot (m_x + m_z)] \quad (50)$$

dove $e_x(\bar{s}_{x,INCAN})$ è l'energia specifica calcolata sullo spostamento medio $\bar{s}_{x,INCAN}$, $e_x(\bar{s}_{x,CANOUT})$ è l'energia specifica calcolata sullo spostamento medio $\bar{s}_{x,CANOUT}$ e $e_x(\bar{s}_{x,CANCAN})$ è l'energia specifica calcolata sullo spostamento medio $\bar{s}_{x,CANCAN}$.

ENERGIA ASSE Y

$$\bar{E}_y = \bar{e}_y(\bar{s}_{y,INLIV}) \cdot (m_x + m_y + m_z + m_U U_{IN}) + \bar{e}_y(\bar{s}_{y,LIVOUT}) \cdot (m_x + m_y + m_z + m_U U_{OUT}) + (1 - \sum_{j=1}^{N_y} \pi_j^2) (U_{TOT} - 1) \bar{e}_y(\bar{s}_{y,LIVLIV}) \cdot (m_x + m_y + m_z + m_U) \quad (51)$$

in cui $e_y(\bar{s}_{y,INLIV})$ è l'energia specifica calcolata sullo spostamento medio $\bar{s}_{y,INLIV}$, $e_y(\bar{s}_{y,LIVOUT})$ è l'energia specifica calcolata sullo spostamento medio $\bar{s}_{y,LIVOUT}$ e $e_y(\bar{s}_{y,LIVLIV})$ è l'energia specifica calcolata sullo spostamento medio $\bar{s}_{y,LIVLIV}$.

Nel caso di *pallet lifter* bisogna considerare m_x e m_z pari a 0.

ENERGIA ASSE Z

$$\bar{E}_z = e_z(\bar{s}_{z,INPOS}) \cdot (2m_z + m_U U_{IN}) + e_z(\bar{s}_{z,POSOUT}) \cdot (2m_z + m_U U_{OUT}) \quad (52)$$

dove $e_z(\bar{s}_{z,INPOS})$ è l'energia specifica calcolata sullo spostamento medio $\bar{s}_{z,INPOS}$ e $e_z(\bar{s}_{z,POSOUT})$ è l'energia specifica calcolata sullo spostamento medio $\bar{s}_{z,POSOUT}$.

4.4 Calcolo del consumo energetico medio nel caso di cicli multipli

Nel caso di cicli multipli le equazioni restano sostanzialmente invariate. Bisogna, però, applicare l'assunzione di considerare il processo come **processo stocastico markoviano**. Definisco, quindi, nuovamente:

$$U_{TOT} = U_{IN} + U_{OUT} \leq 8 \quad (53)$$

In questo caso però viene posto ≤ 8 in quanto viene considerata una capacità di carico del lift pari a 4. Il valore 4 è stato preso come valore limite seguendo le linee guida della FEM.

Per quanto riguarda, invece, il valore di S , in **Figura 24** è presente una matrice che indica i valori che bisogna utilizzare per S in base alle combinazioni di UDC movimentate in input ed in output. Nel *capitolo 4.5* verrà approfondito lo studio relativo agli switch.

Valori $S(I, O, C)$					
O\I	0	1	2	3	4
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,000	0,500	0,667	0,750	1,000
2	0,000	0,667	1,000	1,333	1,667
3	0,000	0,750	1,333	1,786	2,143
4	0,000	1,000	1,667	2,143	2,438

Figura 24 – Tabella dei valori di S .

È necessario, però, inserire una nuova variabile che indichiamo con \bar{W}_c e rappresenta il numero medio di pallet movimentati dal lift per uno spostamento all'interno del ciclo, come visibile in **Figura 25**.

Valori di \bar{W}_c					
O\I	0	1	2	3	4
0	0,000	0,000	1,000	1,500	2,000
1	0,000	1,000	1,500	2,000	2,250
2	1,000	1,500	2,000	2,333	2,467
3	1,500	2,000	2,333	2,543	2,619
4	2,000	2,250	2,467	2,619	2,679

Figura 25 – Tabella dei valori di \bar{W}_c .

Una volta definite queste variabili, si può procedere al calcolo del consumo energetico, come precedentemente fatto nel caso di cicli singoli o doppi.

ENERGIA ASSE X

$$\begin{aligned} \bar{E}_x = & U_{IN} \cdot e_x(\bar{s}_{x,INCAN}) \cdot (m_x + m_z + m_U) + U_{OUT} \cdot e_x(\bar{s}_{x,CANOUT}) \cdot (m_x + m_z + \\ & m_U) + [U_{IN} - S \cdot (\sum_{j=1}^{N_y} \pi_j^2)] \cdot e_x(\bar{s}_{x,CANOUT}) \cdot (m_x + m_z) + [U_{OUT} - S \cdot \\ & (\sum_{j=1}^{N_y} \pi_j^2)] \cdot e_x(\bar{s}_{x,INCAN}) \cdot (m_x + m_z) + S \cdot (\sum_{j=1}^{N_y} \pi_j^2) \cdot e_x(\bar{s}_{x,CANCAN}) \cdot (m_x + m_z) \end{aligned} \quad 54)$$

dove $e_x(\bar{s}_{x,INCAN})$ è l'energia specifica calcolata sullo spostamento medio $\bar{s}_{x,INCAN}$, $e_x(\bar{s}_{x,CANOUT})$ è l'energia specifica calcolata sullo spostamento medio $\bar{s}_{x,CANOUT}$ e $e_x(\bar{s}_{x,CANCAN})$ è l'energia specifica calcolata sullo spostamento medio $\bar{s}_{x,CANCAN}$.

ENERGIA ASSE Y

$$\begin{aligned} \bar{E}_y = & \bar{e}_y(\bar{s}_{y,INLIV}) \cdot (m_x + m_y + m_z + m_U U_{IN}) + \bar{e}_y(\bar{s}_{y,LIVOUT}) \cdot (m_x + m_y + \\ & m_z + m_U U_{OUT}) + (1 - \sum_{j=1}^{N_y} \pi_j^2) (U_{TOT} - 1) \bar{e}_y(\bar{s}_{y,LIVLIV}) \cdot (m_x + m_y + m_z + \\ & m_U \cdot W_c) \end{aligned} \quad 55)$$

dove $m_U \cdot W_c$ rappresentano il numero di pallet moltiplicati per il proprio peso, movimentati mediamente nel ciclo, $e_y(\bar{s}_{y,INLIV})$ è l'energia specifica calcolata sullo spostamento medio $\bar{s}_{y,INLIV}$, $e_y(\bar{s}_{y,LIVOUT})$ è l'energia specifica calcolata sullo spostamento medio $\bar{s}_{y,LIVOUT}$ e $e_y(\bar{s}_{y,LIVLIV})$ è l'energia specifica calcolata sullo spostamento medio $\bar{s}_{y,LIVLIV}$.

Nel caso di *pallet lifter* bisogna considerare m_x e m_z pari a 0.

ENERGIA ASSE Z

$$\begin{aligned} \bar{E}_z = & U_{IN} \cdot e_z(\bar{s}_{z,INPOS}) \cdot (m_z + m_U) + U_{OUT} \cdot e_z(\bar{s}_{z,POSOUT}) \cdot (m_z + m_U) + U_{TOT} \cdot \\ & [(e_z(\bar{s}_{z,INPOS}) + e_z(\bar{s}_{z,POSOUT}))] \cdot m_z \end{aligned} \quad 56)$$

dove $e_z(\bar{s}_{z,INPOS})$ è l'energia specifica calcolata sullo spostamento medio $\bar{s}_{z,INPOS}$ e $e_z(\bar{s}_{z,POSOUT})$ è l'energia specifica calcolata sullo spostamento medio $\bar{s}_{z,POSOUT}$.

4.5 Focus su Switch orizzontali e verticali

Come detto in precedenza, S rappresenta il numero medio di *switch* che avvengono nel ciclo sullo stesso piano orizzontale. Nel caso di cicli multipli, si crea un problema legato al numero di UDC che vengono movimentate in un ciclo e la capacità di carico del *lift*.

Possiamo, quindi, definire:

$$S = \frac{\sum_{c=1}^{C_{acc}} \text{Numero di Switch nel ciclo}_c}{C_{acc}} \quad (57)$$

dove la sommatoria viene effettuata per tutti i cicli in cui l'ordine delle operazioni renda il ciclo accettabile.

Nell'**APPENDICE B**, sono presenti tutti i calcoli empirici che hanno permesso di calcolare S .

In questa tesi, il problema del calcolo della S è stato affrontato in maniera empirica calcolando manualmente i valori e le combinazioni accettabili. Questo, perché la risoluzione analitica tramite l'utilizzo di una formula è risultata piuttosto complicata.

4.6 Calcolo dei consumi energetici finali

Per calcolare i consumi energetici finali è necessario sommare i consumi su tutti gli assi, trovando così il consumo di un ciclo e, inoltre, bisogna aggiungere anche i consumi legati al sollevamento del pallet da parte dei macchinari per le operazioni di stoccaggio o prelievo.

$$\bar{E}_{TOTCICLO} = \bar{E}_x + \bar{E}_y + \bar{E}_z + 2U_{TOT}\bar{E}_U \quad (58)$$

4.7 Verifica modello analitico

Dato che non è stato possibile ricevere i dati relativi ai consumi reali di un magazzino, non è possibile validare il modello ma, nonostante ciò, quest'ultimo è stato verificato utilizzando un simulatore programmato tramite il *software R*. Nell'**APPENDICE C** è possibile visionare la verifica del modello analitico. Di seguito, sono presenti i grafici relativi ai risultati delle simulazioni e la comparazione con i valori stimati tramite il modello analitico. I dati di input quali dimensioni delle ubiche e il peso dei macchinari sono stati presi dalla letteratura e, inoltre, è stato settato una percentuale di riempimento del magazzino iniziale pari al **30%**. La logica di stoccaggio utilizzata nel simulatore è quella randomica.

Il simulatore è stato testato con un numero di cicli pari a 1000 in modo da garantire robustezza ai risultati ottenuti. Sono stati considerati unicamente i consumi relativi agli spostamenti dei macchinari e non alla presa in carico dei pallet, poiché è un valore costante sempre presente. Inoltre, i test per validare il modello analitico sono stati effettuati considerando 3 tipi di task differenti:

- 2 Input e 2 Output
- 3 Input e 3 Output
- 4 Input e 4 Output

Caso 2 Input e 2 Output

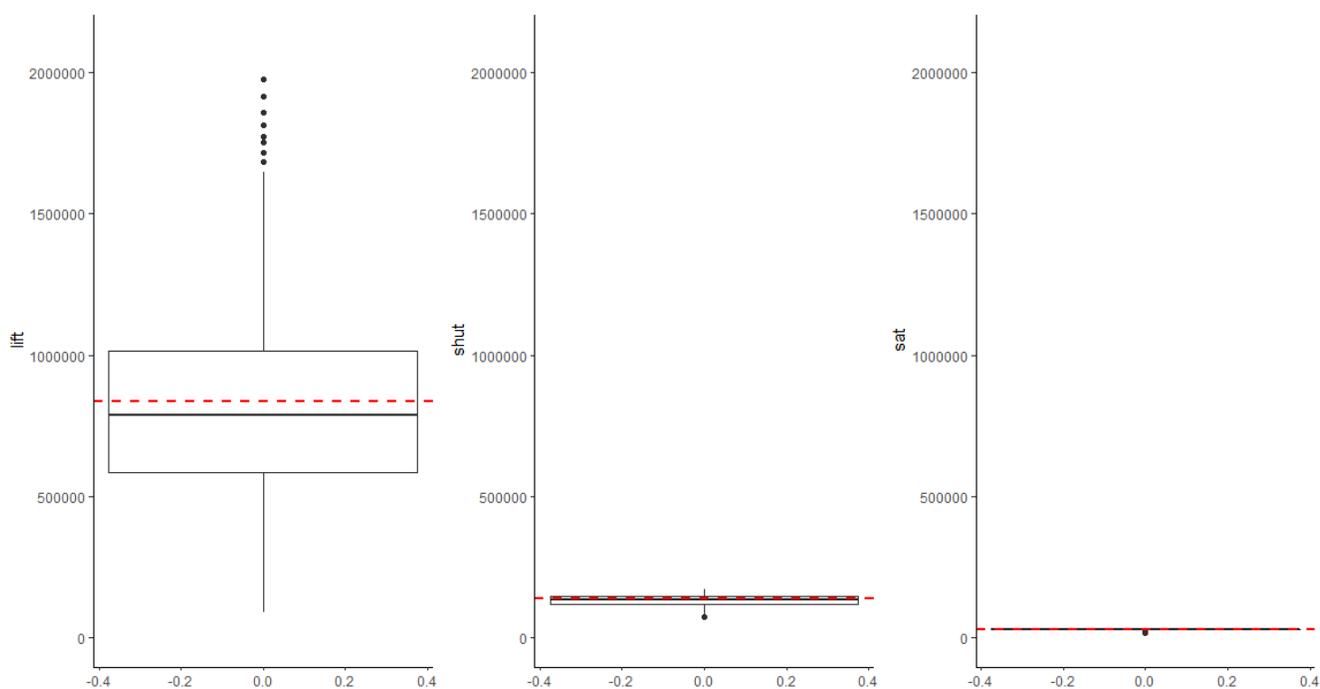


Figura 26 – Plot del consumo energetico per ogni macchinario, nel caso di ciclo composto da due input e da due output. La linea tratteggiata rossa rappresenta il valore calcolato secondo il modello analitico.

- Errore per asse X: 0.04165702
- Errore per asse Y: 0.01752931
- Errore per asse Z: -0.01618379
- Errore totale della stima dei consumi: 0.01980721

Caso 3 Input e 3 Output

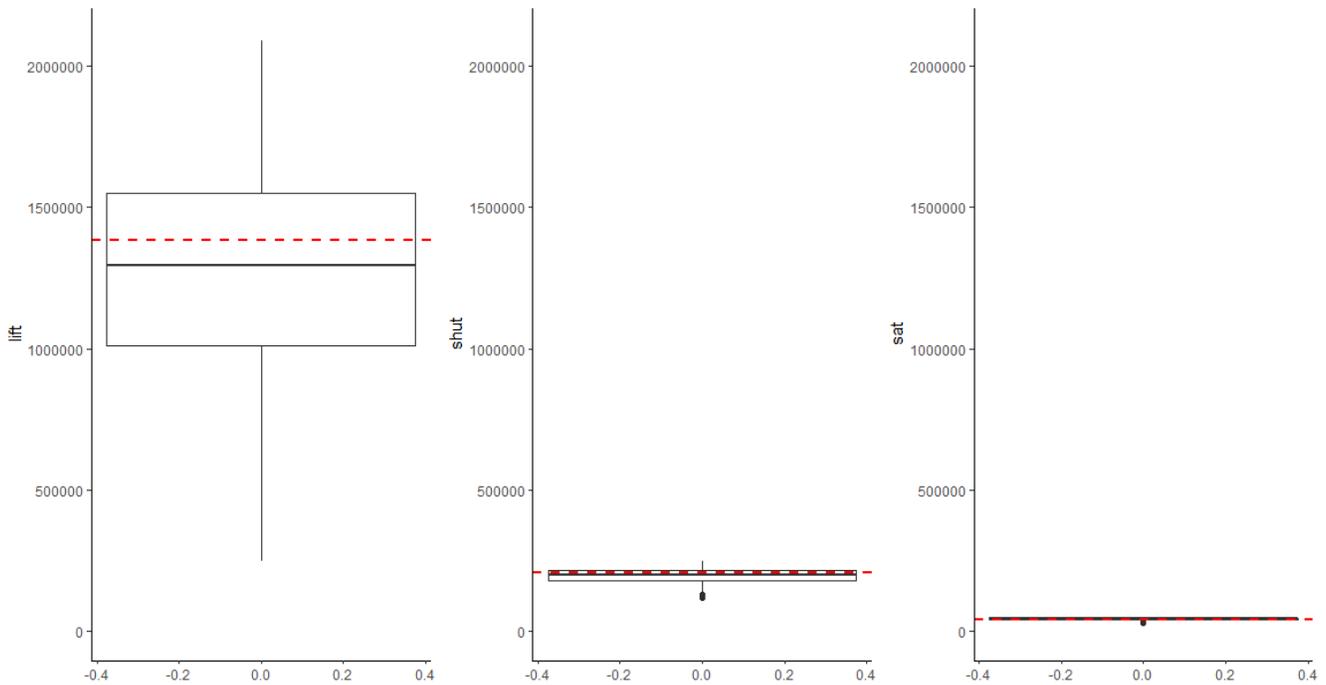


Figura 27 – Plot del consumo energetico per ogni macchinario, nel caso di ciclo composto da tre input e da tre output. La linea tratteggiata rossa rappresenta il valore calcolato secondo il modello analitico.

- Errore per asse X: 0.04126678
- Errore per asse Y: 0.01938554
- Errore per asse Z: -0.01078988
- Errore totale della stima dei consumi: 0.02130224

Caso 4 Input e 4 Output

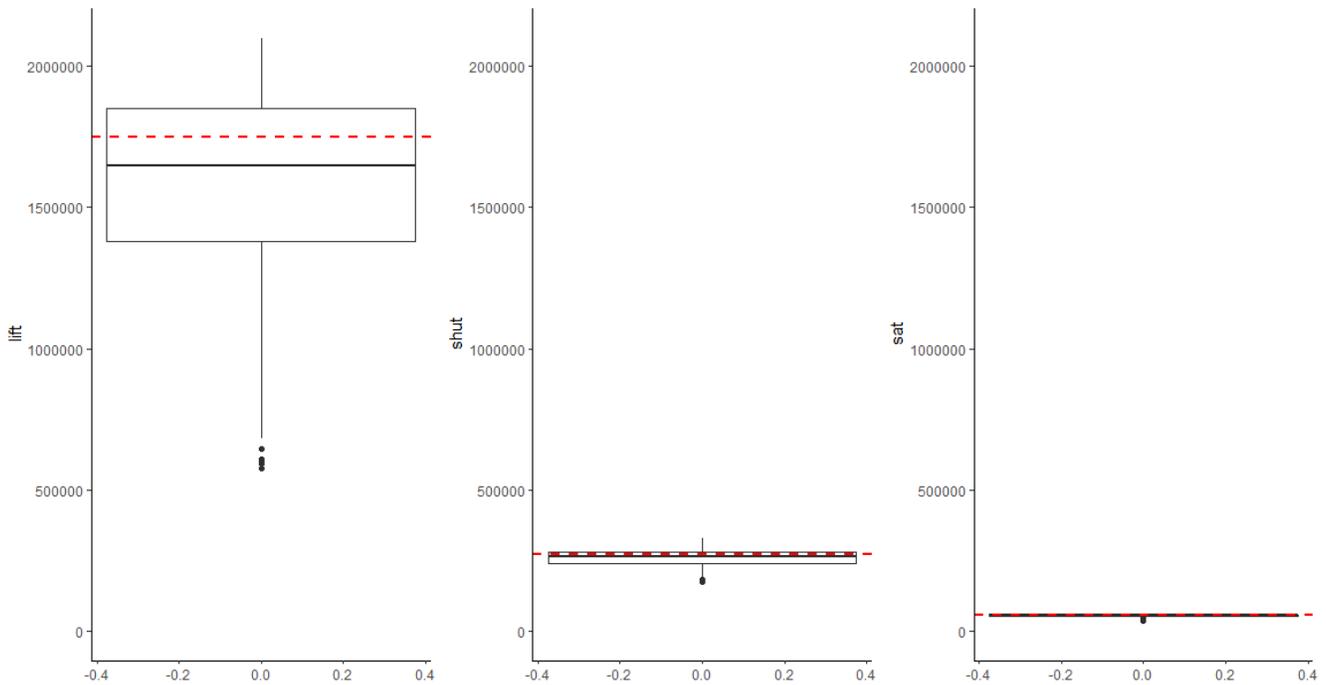


Figura 28 – Plot del consumo energetico per ogni macchinario, nel caso di ciclo composto da quattro input e da quattro output. La linea tratteggiata rossa rappresenta il valore calcolato secondo il modello analitico.

- Errore per asse X: 0.0495271
- Errore per asse Y: -0.007999217
- Errore per asse Z: -0.007939444
- Errore totale della stima dei consumi: -0.001294098

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Negli ultimi decenni lo sviluppo tecnologico ci ha permesso di raggiungere prestazioni prima inimmaginabili. Computer, robot e l'automazione in generale, hanno permesso di ridurre al massimo i tempi ma, dall'altra parte della bilancia, il nostro modello di sviluppo ha portato i consumi energetici a livelli non più sostenibili.

Da qualche anno, sono iniziati i primi lavori incentrati sulla valutazione e ottimizzazione dei consumi energetici. L'obiettivo di questa tesi, infatti, è quello di fornire nuovi strumenti e modelli che permettano di valutare al meglio i consumi dei magazzini.

Tramite il modello energetico e quello analitico, è quindi possibile valutare il consumo energetico relativo alle movimentazioni dei pallet e dei macchinari all'interno di essi. La comparazione è possibile non solo tra magazzini differenti, ma anche tra diverse logiche di stoccaggio all'interno dello stesso.

Da questo lavoro, si può partire per sviluppare una formula che permetta di stimare, all'interno del ciclo, il numero di switch orizzontali effettuati e le masse movimentate dal lift.

Uno sviluppo futuro sarebbe stimare, oltre al valore atteso dei consumi energetici, anche la loro varianza.

Infine, si potrebbe lavorare sull'ampliamento del modello analitico, considerando non più un solo macchinario per tipologia ma, come avviene anche nella realtà, un sistema composto da più di uno shuttle e un satellite.

APPENDICE A

APPENDICE VALIDAZIONE MODELLO ENERGETICO

Di seguito sono rappresentati i valori inseriti e calcolati per dei generici spostamenti sugli'assi.

$s_x(i)$	13	a_x	0,5	d_x	0,5	$v_{x,sup}$	2	$v_{x,set}(i)$	2
$s_y(j)$	8	a_y	0,3	d_y	0,3	$v_{y,sup}$	0,2	$v_{y,set}(j)$	0,2
$s_z(k)$	4	a_z	0,5	d_z	0,5	$v_{z,sup}$	1,2	$v_{z,set}(k)$	1,2
$c_{r,x}$	0,01	$s_{x,a,set}(i)$	4	$s_{x,d,set}(i)$	4	$v_{x,get}(i)$	2	$s_{x,set}(i)$	8
$c_{r,y}$	0,01	$s_{y,a,set}(j)$	0,067	$s_{y,d,set}(j)$	0,067	$v_{y,get}(j)$	0,2	$s_{y,set}(j)$	0,133
$c_{r,z}$	0,01	$s_{z,a,set}(k)$	1,44	$s_{z,d,set}(k)$	1,44	$v_{z,get}(k)$	1,2	$s_{z,set}(k)$	2,88
η_x	0,8	$t_{x,a}(i)$	4	$t_{x,c}(i)$	2,5	$t_{x,d}(i)$	4	m_x	750
η_y	0,8	$t_{y,a}(j)$	0,667	$t_{y,c}(j)$	39,333	$t_{y,d}(j)$	0,667	m_y	1000
η_z	0,8	$t_{z,a}(k)$	2,4	$t_{z,c}(k)$	0,933	$t_{z,d}(k)$	2,4	m_z	250
								m_u	1000
f_r	1,15	g	9,81						

Una volta calcolate le variabili cinematiche sono state calcolate le potenze specifiche secondo l'ultimo modello di Ekren e poi secondo il modello da me proposto.

Da notare come il risultato finale sia uguale ma secondo il modello di Ekren le potenze specifiche sull'asse Y sono uguali sia nel caso di moto sia ascendente sia in quello di moto discendente. Utilizzando il mio modello si può notare invece una diversificazione delle potenze specifiche in base al tipo di moto sull'asse Y.

Per quanto riguarda, invece, gli spostamenti sull'asse X e sull'asse Z i due modelli sono perfettamente analoghi.

Di seguito la tabella riassuntiva delle potenze specifiche calcolate utilizzando i due modelli

Modello Ekren

POTENZA SPECIFICA SULL'ASSE X	IN ACCELERAZIONE IN DECELERAZIONE A VELOCITA COSTANTE	1,68275 1,19225 0,24525	POTENZA SPECIFICA SULL'ASSE Z	IN ACCELERAZIONE IN DECELERAZIONE A VELOCITA COSTANTE	1,00965 0,71535 0,14715
POTENZA SPECIFICA SULL'ASSE Y IN SALITA	IN ACCELERAZIONE IN DECELERAZIONE A VELOCITA COSTANTE	2,53875 2,36625 2,4525	POTENZA SPECIFICA SULL'ASSE Y IN DISCESA	IN ACCELERAZIONE IN DECELERAZIONE A VELOCITA COSTANTE	2,36625 2,53875 2,4525
POTENZA SPECIFICA SULL'ASSE X	12,113125		POTENZA SPECIFICA SULL'ASSE Z	6,914715	
POTENZA SPECIFICA SULL'ASSE Y IN SALITA	26,16		POTENZA SPECIFICA SULL'ASSE Y IN DISCESA	26,16	
POTENZA SPECIFICA SPESA PER LO SPOSTAMENTO	71,34784				

Nuovo modello proposto

POTENZA SPECIFICA SULL'ASSE X	IN ACCELERAZIONE IN DECELERAZIONE A VELOCITA COSTANTE	1,68275 1,19225 0,24525	POTENZA SPECIFICA SULL'ASSE Z	IN ACCELERAZIONE IN DECELERAZIONE A VELOCITA COSTANTE	1,00965 0,71535 0,14715
POTENZA SPECIFICA SULL'ASSE Y IN SALITA	IN ACCELERAZIONE IN DECELERAZIONE A VELOCITA COSTANTE	2,56328 2,39078 2,47703	POTENZA SPECIFICA SULL'ASSE Y IN DISCESA	IN ACCELERAZIONE IN DECELERAZIONE A VELOCITA COSTANTE	2,34173 2,51423 2,42798
POTENZA SPECIFICA SULL'ASSE X	12,11313		POTENZA SPECIFICA SULL'ASSE Z	6,91472	
POTENZA SPECIFICA SULL'ASSE Y IN SALITA	26,42160		POTENZA SPECIFICA SULL'ASSE Y IN DISCESA	25,89840	
POTENZA SPECIFICA SPESA PER LO SPOSTAMENTO	71,34784				

APPENDICE B

APPENDICE CALCOLO VALORI RELATIVI AL NUMERO DI SWITCH

MEDIO (S) ED IL NUMERO MEDIO DI UDC MOVIMENTATE (\bar{W}_c)

Di seguito sono presenti gli schemi e le tabelle utilizzate per il calcolo di S e W_c . In particolare, con la scritta rossa sono segnalate le combinazioni non accettabili e, sotto la voce UDC ciclo è presente la somma delle masse movimentate in tutti gli spostamenti da parte del lift.

Input	1	Input	1	Input	1	Input	1
Output	1	Output	2	Output	3	Output	4
U tot	2	U tot	3	U tot	4	U tot	5
Combinazioni	2	Combinazioni	3	Combinazioni	4	Combinazioni	5
Accettabili	2	Accettabili	3	Accettabili	4	Accettabili	4
Tot S	1	Tot S	2	Tot S	3	Tot S	4
$S(I, O, C)$	0,500	$S(I, O, C)$	0,667	$S(I, O, C)$	0,750	$S(I, O, C)$	1,000
Tot UDC	2	Tot UDC	9	Tot UDC	24	Tot UDC	36
UDC medie ciclo	1,000	UDC medie ciclo	3,000	UDC medie ciclo	6,000	UDC medie ciclo	9,000
\bar{W}_c	1,000	\bar{W}_c	1,500	\bar{W}_c	2,000	\bar{W}_c	2,250

Combinazione	UDC ciclo
io	0
oi	2

Combinazione	UDC ciclo
ioo	1
oio	3
ooi	5

Combinazione	UDC ciclo
iooo	2
oioo	5
ooio	8
oooi	9

Combinazione	UDC ciclo
ioooo	6
oiooo	8
ooioo	10
oooi	12
ooooi	

Input	2	Input	2	Input	2	Input	2
Output	1	Output	2	Output	3	Output	4
U tot	3	U tot	4	U tot	5	U tot	6
Combinazioni	3	Combinazioni	6	Combinazioni	10	Combinazioni	15
Accettabili	3	Accettabili	6	Accettabili	9	Accettabili	9
Tot S	2	Tot S	6	Tot S	12	Tot S	15
$S(I, O, C)$	0,667	$S(I, O, C)$	1,000	$S(I, O, C)$	1,333	$S(I, O, C)$	1,667
Tot UDC	9	Tot UDC	36	Tot UDC	84	Tot UDC	111
UDC medie ciclo	3,000	UDC medie ciclo	6,000	UDC medie ciclo	9,333	UDC medie ciclo	12,333
\bar{W}_c	1,500	\bar{W}_c	2,000	\bar{W}_c	2,333	\bar{W}_c	2,467

Combinazione	UDC ciclo
ioo	1
ioi	3
oii	5

Combinazione	UDC ciclo
iiio	2
ioio	4
iooi	6
oioo	6
oioi	8
ooii	10

Combinazione	UDC ciclo
iiooo	4
ioioo	6
iooio	8
iooii	10
oiiio	8
oioio	10
oiooi	12
ooiio	12
ooioi	14
ooiio	

Combinazione	UDC ciclo
iioooo	7
ioiooo	9
iooioo	11
ioooio	13
iooooi	
oiiooo	11
oioioo	13
oiooio	15
oioooi	
ooiioo	15
ooioio	17
ooiooi	
oooiio	
oooiio	
oooiio	
oooiio	

Input	3	Input	3	Input	3	Input	3
Output	1	Output	2	Output	3	Output	4
U tot	4	U tot	5	U tot	6	U tot	7
Combinazioni	4	Combinazioni	10	Combinazioni	20	Combinazioni	35
Accettabili	4	Accettabili	9	Accettabili	14	Accettabili	14
Tot S	3	Tot S	12	Tot S	25	Tot S	30
$S(I, O, C)$	0,750	$S(I, O, C)$	1,333	$S(I, O, C)$	1,786	$S(I, O, C)$	2,143
Tot UDC	24	Tot UDC	84	Tot UDC	178	Tot UDC	220
UDC medie ciclo	6,000	UDC medie ciclo	9,333	UDC medie ciclo	12,714	UDC medie ciclo	15,714
\bar{W}_c	2,000	\bar{W}_c	2,333	\bar{W}_c	2,543	\bar{W}_c	2,619

Combinazione	UDC ciclo
iiio	3
iooi	5
ioii	7
oiii	9

Combinazione	UDC ciclo
iiioo	4
iiioi	6
iiioi	8
ioiio	8
ioioi	10
iooii	12
oiiio	10
oiiio	12
oioii	14
ooiii	

Combinazione	UDC ciclo
iiiooo	6
iiiooi	8
iiioio	10
iiiooi	12
ioiioo	10
ioioio	12
ioiooi	14
iooioo	14
iooioi	16
ioooii	
oiiioo	12
oioioo	14
oioioi	16
oioioi	16
oioioi	18
oiooii	
ooiiio	
ooioio	
ooioii	
ooioii	

Combinazione	UDC ciclo
iiioooo	9
iiioooo	11
iiiooio	13
iiiooio	15
iiooooi	
ioiiooo	13
ioioioo	15
ioiooio	17
ioooooi	
iooiooo	17
iooioio	19
iooiooi	
ioooioo	
ioooioi	
ioooooii	
oiiiooo	15
oiiioio	17
oiiioio	19
oiioooo	
oioiooo	19
oioioio	21
oioiooi	
oiooioo	
oiooioi	

oioooii
ooiioo
ooiioio
ooiiooi
ooioiio
ooioioi
ooiooii
ooiioo
ooiioi
ooioiio
ooioiio

Input	4	Input	4	Input	4	Input	4
Output	1	Output	2	Output	3	Output	4
U tot	5	U tot	6	U tot	7	U tot	8
Combinazioni	5	Combinazioni	15	Combinazioni	35	Combinazioni	70
Accettabili	4	Accettabili	9	Accettabili	14	Accettabili	16
Tot S	4	Tot S	15	Tot S	30	Tot S	39
$S(I, O, C)$	1,000	$S(I, O, C)$	1,667	$S(I, O, C)$	2,143	$S(I, O, C)$	2,438
Tot UDC	36	Tot UDC	111	Tot UDC	220	Tot UDC	300
UDC medie ciclo	9,000	UDC medie ciclo	12,333	UDC medie ciclo	15,714	UDC medie ciclo	18,750
\bar{W}_c	2,250	\bar{W}_c	2,467	\bar{W}_c	2,619	\bar{W}_c	2,679

Combinazione	UDC ciclo
--------------	-----------

iiiio 6
 iiioi 8
 iioii 10
 ioiii 12
oiiii

Combinazione	UDC ciclo
--------------	-----------

iiiioo 7
 iiioio 9
 iiooii 11
 iioiio 11
 iioioi 13
 iiooii 15
 ioiioo 13
 ioiioi 15
 ioioii 17
iooiii
oiiiio
oiiioi
oiiioi
oioiii
ooiiii

Combinazione	UDC ciclo
--------------	-----------

iiiiooo 9
 iiioioo 11
 iiooioo 13
 iiooooi 15
 iioiioo 13
 iioioio 15
 iioiooi 17
 iiooioo 17
 iiooioi 19
iioooii
 ioiioo 15
 ioiioio 17
 ioiiooi 19
 ioioiio 19
 ioioioi 21
ioiooii
iooiiiio
iooiiioi
iooioii
ioooiii
oiiiioo
oiiioio
oiiiooi
oiooioo

Combinazione	UDC ciclo
--------------	-----------

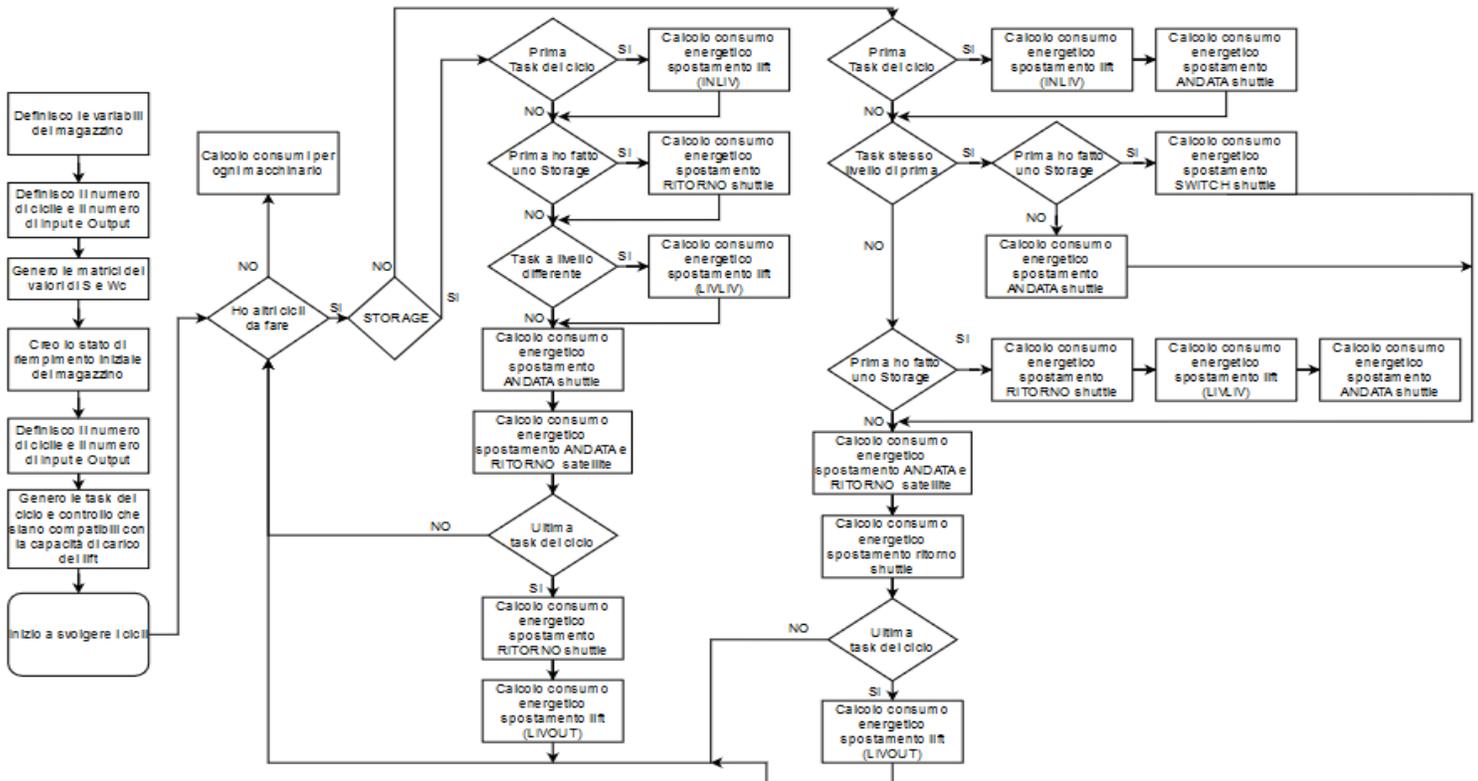
iiiiooooo 12
 iiioioooo 14
 iiooioooo 16
 iioooioo 18
iiiiooooo
 iioiioooo 16
 iioioiooo 18
 iioiooioo 20
 iioiooooo 17
 iiooioioo 20
 iiooioioo 22
 iiooiooio 19
iiiooioio
iiiooioi
iiiooioi
 ioiiooooo 18
 ioiioiooo 20
 ioiiooioo 24
 ioiiooooo 22
 ioiioiooo 22
ioioiooio
ioioiooio
ioiooioi

ooiioii
ooioiii
ooooiiii

APPENDICE C

APPENDICE VALIDAZIONE MODELLO ANALITICO TRAMITE SIMULATORE

Di seguito è rappresentato il *flow-chart* del simulatore progettato tramite il *software R*.



Notes

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- ¹ **Rafele Carlo, Carlin Antonio** (2019) Slide del corso di Supply Chain Management.
- ² **Henk Zijm, Matthias Klumpp, Alberto Regattieri, Sunderesh Heragu** (2019) Operations, Logistics and Supply Chain Management – Series di Lecture Notes in Logistics edito da Uwe Clausen, Michael ten Hompel e Robert de Souza.
- ³ Per informazioni generali sulle **logiche di gestione dei magazzini** ho consultato: <https://www.mecalux.it/manuale-logistica-magazzino/magazzino/gestione-magazzino>.
- ⁴ Per approfondimenti sulla **classificazione e valutazione degli indici di performance (KPI)** dei magazzini ho considerato la fonte: <https://www.mecalux.it/blog/kpi-magazzino>.
- ⁵ **Kaveh Azadeh, René De Koster, Debjit Roy** (2019) Robotized and Automated Warehouse Systems: Review and Recent Developments. Transportation Science 53(4):917-945.
<https://doi.org/10.1287/trsc.2018>
- ⁶ **FEM European materials handling federation** (2017) Standard 9.860. Cycle time calculation for automated vehicle storage and retrieval systems.
- ⁷ **Malmborg CJ** (2002) Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems. Int J Prod Res 40(8):1807– 1822.
<https://doi.org/10.1080/00207540110118668>
- ⁸ **Malmborg CJ** (2003) Interleaving dynamics in autonomous vehicle storage and retrieval systems. Int J Prod Res 41(5):1057– 1069.
<https://doi.org/10.1080/0020754021000033887>
- ⁹ **Kuo PH, Krishnamurthy A, Malmborg CJ** (2007) Design models for unit load storage and retrieval systems using autonomous vehicle technology and resource conserving storage and dwell point policies. Appl Math Model 31:2332–2346.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.09.011>
- ¹⁰ **Fukunari M, Malmborg CJ** (2008) An efficient cycle time model for autonomous vehicle storage and retrieval systems. Int J Prod Res 46(12):3167–3184.
<https://doi.org/10.1080/00207540601118454>
- ¹¹ **Fukunari M, Malmborg CJ** (2009) A network queuing approach for evaluation of performance measures in autonomous vehicle storage and retrieval systems. Eur J Oper Res 193(1):152–167.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.10.049>
- ¹² **Zhang L, Krishnamurthy A, Malmborg CJ, Heragu SS** (2009) Variance-based approximations of transaction waiting times in autonomous vehicle storage and retrieval systems. Eur J Ind Eng 3(2):146–169.
<https://doi.org/10.1504/EJIE.2009.023603>

- ¹³ **Roy D, Krishnamurthy A, Heragu SS, Malmborg CJ (2012)** Performance analysis and design trade-offs in warehouses with autonomous vehicle technology. *IIE Trans* 44(12):1045–1060.
<https://doi.org/10.1080/0740817X.2012.665201>
- ¹⁴ **Roy D, Krishnamurthy A, Heragu SS, Malmborg CJ (2015)** Stochastic models for unit-load operations in warehouse systems with autonomous vehicles. *Ann Oper Res* 231(1):129–155.
<https://doi.org/10.1007/s10479-014-1665-8>
- ¹⁵ **Roy D, Krishnamurthy A, Heragu SS, Malmborg CJ (2017)** A multi-tier linking approach to analyze performance of autonomous vehicle-based storage and retrieval systems. *Comput Oper Res* 83:173–188.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.02.012>
- ¹⁶ **Epp M, Wiedemann S, Furmans K (2017)** A discrete-time queue- ing network approach to performance evaluation of autonomous vehicle storage and retrieval systems. *Int J Prod Res* 55(4):960– 978.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1208371>
- ¹⁷ **Ekren BY, Heragu SS (2009)** Simulation based regression analysis for rack configuration of autonomous vehicle storage and retrieval system. *The 2009 Winter Simulation Conference*.
- ¹⁸ **Marchet G, Melacini M, Perotti S, Tappia E (2012)** Ana- lytical model to estimate performances of autonomous vehi- cle storage and retrieval systems for product totes. *Int J Prod Res* 50(24):7134–7148.
<https://doi.org/10.1080/2011.639815>
- ¹⁹ **Lerher T, Ekren BY, Dukic G, Rosi B (2015)** Travel time model for shuttle-based storage and retrieval sys- tems. *Int J of Adv Manuf Tech* 78(9):1705–1725.
<https://doi.org/10.1007/s00170-014-6726-2> ^{SEP}
- ²⁰ **Lerher T (2016)** Travel time model for double-deep shuttle-based storage and retrieval systems. *Int J Prod Res* 54(9):2519–2540.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1061717>
- ²¹ **Lerher T (2018)** Aisle changing shuttle carriers in autonomous vehicle storage and retrieval systems. *Int J Prod Res* 56(11):3859– 3879.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1467060>
- ²² **Ekren BY, Akpunar A, Sari Z, Lerher T (2018)** A tool for time, variance and energy related performance estimations in a shuttle- based storage and retrieval system. *Appl Math Model* 63:109–127.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.06.037> ^{SEP}

- 23 **Borovinsek M, Ekren BY, Burinskiene A, Lerher T (2017)** Multi-objective optimisation model of shuttle-based storage and retrieval system. *Transport* 32(2):120–137.
<https://doi.org/10.3846/16484142.2016.1186732> SEP
- 24 **Ning Z, Lei L, Saipeng Z, Lodewijks G (2016)** An efficient simulation model for rack design in multi-elevator shuttle-based storage and retrieval system. *Simul Modell Pract Theory* 67:100–116.
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.03.007>
- 25 **Lerher T, Ekren BY, Sari Z, Rosi B (2015)** Simulation analysis of shuttle based storage and retrieval systems. *Int J Simul Modell* 14(1):48–59.
[https://doi.org/10.2507/IJSIMM14\(1\)5.281](https://doi.org/10.2507/IJSIMM14(1)5.281) SEP
- 26 **Lerher T, Borovinsek M, Ficko M, Palcic I (2017)** Parametric study of throughput performance in SBS/RS based on simulation. *Int J Simul Model* 16(1):96–107.
[https://doi.org/10.2507/IJSIMM16\(1\)8.372](https://doi.org/10.2507/IJSIMM16(1)8.372) SEP
- 27 **Ekren BY (2017)** Graph-based solution for performance evaluation of Shuttle-Based Storage and Retrieval System. *Int J Prod Res* 55(21):6516–6526.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1203076>
- 28 **Ha Y, Chae J (2019)** A decision model to determine the number of shuttles in a tier-to-tier SBS/RS. *Int J Prod Res* 57(4):963–984.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1476787>
- 29 **Tappia E, Roy D, De Koster R, Melacini M (2017)** Modeling, analysis, and design insights for Shuttle-Based Compact Storage Systems. *Transport Sci* 51(1):269–295.
<https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0699>
- 30 **Manzini R, Accorsi R, Baruffaldi G, Cennerazzo T, Gamberi M (2016)** Travel time models for deep-lane unit-load autonomous vehicle storage and retrieval system (AVS/RS). *Int J Prod Res* 54(14):4286–4304.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1144241>
- 31 **Ekren BY, Heragu SS, Krishnamurthy A, Malmborg CJ (2010)** Simulation based experimental design to identify factors affecting performance of AVS/RS. *Comput Ind Eng* 58:175–185.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.10.004>
- 32 **D’Antonio G, De Maddis M, Sauza Bedolla J, Chiabert P, Lombardi F (2018)** Analytical models for the evaluation of deep-lane autonomous vehicle storage and retrieval system performance. *Int J of Adv Manuf Tech* 94(5-8):1811–1824.
<https://doi.org/10.1007/s00170-017-0313-2>
- 33 **Banu Yetkin Ekren (2020)** A multi-objective optimisation study for the design of an AVS/RS warehouse, *International Journal of Production Research*, DOI: [10.1080/00207543.2020.1720927](https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1720927).