

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale



Tesi di Laurea Magistrale

Magazzini automatici: analisi dei principali indici di performance
con riferimento alla norma ISO 22400

Relatore:

Prof.ssa Giulia Bruno

Candidato:

Eleonora Pinna

Correlatore:

Prof. Franco Lombardi

Dott. Alberto Faveto

Dott. Emiliano Traini

Anno accademico 2020/2021

“What gets measured,
gets managed.”

Peter Drucker

ABSTRACT

La gestione del magazzino rappresenta una parte fondamentale dell'organizzazione interna della supply chain di un'impresa. Negli ultimi anni, si è reso necessario trovare soluzioni che permettano miglioramenti nelle performance dell'intera catena produttiva e i magazzini automatici, o Automated Warehouse Systems (AWS), hanno rappresentato una soluzione altamente efficace a questo problema. A tal riguardo, sono stati sviluppati diversi lavori che analizzano gli indici di performance (KPI) utilizzati per la valutazione delle operazioni svolte e il miglioramento delle loro prestazioni. L'obiettivo di questa tesi è quello di effettuare uno studio dei KPI maggiormente presenti in letteratura (analizzandoli analiticamente) e di studiare le correlazioni tra di essi, così da avere una visione globale degli indicatori che maggiormente impattano sulle decisioni di gestione degli AWS.

L'analisi dei KPI è stata svolta seguendo l'impostazione prevista dalla norma ISO 22400, focalizza proprio sull'ottimizzazione delle performance gestionali. In particolare, per ogni indice vengono fornite le seguenti informazioni: descrizione generale, ambito in cui è rilevante (es. work unit, work center, etc.), formula matematica grazie alla quale può essere calcolato, unità di misura, range all'interno del quale ricadono i suoi valori, e trend per valutare se i risultati ottenuti siano soddisfacenti o meno. Lo studio delle relazioni tra gli indici analizzati e le variabili che compongono le loro formule matematiche ha permesso di evidenziare gli aspetti che hanno una maggiore influenza sulle performance di tutto il magazzino, valutando come i KPI interagiscano vicendevolmente e come le variabili debbano essere modificate affinché si ottengano risultati soddisfacenti per l'ottimizzazione delle performance degli AWS.

In conclusione, è stato possibile evidenziare gli aspetti su cui le aziende produttrici o utilizzatrici di AWS debbano intervenire per ottimizzarne le prestazioni e minimizzare i costi, con l'obiettivo di ottenere un miglioramento nella gestione generale delle operazioni svolte, nell'ottimizzazione degli spazi utilizzati, nella riduzione degli errori che si possono verificare e nel miglioramento della qualità del prodotto o servizio offerto.

Sommario

1	INTRODUZIONE	11
2	DESCRIZIONE MAGAZZINI AUTOMATICI	12
2.1	Tipologie di magazzini automatici	13
3	DESCRIZIONE NORMA ISO 22400.....	17
4	ANALISI INDICI DI PERFORMANCE	21
4.1	Scelta degli indici di performance	21
4.1.1	Indici di tempo.....	25
4.1.2	Cycle time.....	25
4.1.3	Travel time.....	27
4.1.4	Storage and retrieval time.....	30
4.1.5	Picking orders time	31
4.1.6	Tempo funzionamento	32
4.1.7	Tempo di attesa e code	33
4.1.8	Tempo di ricarica della batteria	33
4.1.9	Tempo di accesso alla stazione di ricarica.....	35
4.2	Indici economici	36
4.2.1	Costi di investimento e gestione	36
4.2.2	Costi di gestione del personale	37
4.2.3	Costo di manutenzione	38
4.2.4	Costo di inventario.....	39
4.2.5	Inventory turnover	40
4.3	Indici ambientali.....	41
4.3.1	Coefficiente di utilizzo volumetrico	41
4.3.2	Coefficiente di utilizzo superficiale.....	42
4.3.3	Spazio libero	43
4.3.4	Temperatura.....	44
4.4	Indici di qualità.....	44
4.4.1	Throuhput	44
4.4.2	Collo di bottiglia.....	46
4.4.3	Errore medio	47
4.4.4	Stock rotation.....	48

4.4.5	Utilizzo scaffali.....	48
4.4.6	Utilizzo medio risorse.....	49
4.4.7	Selettività.....	50
4.4.8	Ricettività	51
4.4.9	Consumo di energia	53
4.4.10	Picco di utilizzo	55
4.5	Efficienza AGV	56
4.5.1	Numero veicoli	56
4.5.2	Efficacia nel riconoscere gli item	57
4.5.3	Autonomia batteria veicolo	59
4.5.4	Numero collisioni	60
4.5.5	Traffico presente nel magazzino.....	63
5	Analisi delle variabili.....	65
5.1	Classificazione e discussione.....	66
5.1.1	Variabili con influenza forte	66
5.1.2	Variabili con influenza media.....	70
5.1.3	Altre variabili.....	73
5.2	Analisi indici maggiormente influenzati	77
6	Conclusioni.....	80
7	Bibliografia.....	83

Indice delle figure

Figura 1 Schema tipologie AWS (Degiovanni, 2019)	14
Figura 2 Rappresentazione di un sistema AVS/RS (Ekren, 2011)	16
Figura 3 Livelli elaborati nella norma IEC 62264 (Zhu, 2017)	18
Figura 4 Schema identificativo della metodologia di selezione degli articoli (Faveto A., 2020).....	22
Figura 5 A general layout of automated warehouse system (Liu, 2018)	28
Figura 6 Visione frontale di un magazzino con r righe e c colonne (Khojasteh, 2016)	28
Figura 7 Processo singolo e complesso svolto dal traslo elevatore (Lenoble N., 2018).....	30
Figura 8 Stazione di ricarica identificata dal tag e robot con cilindri adibiti alla ricarica (Geng, 2017)	34
Figura 9 Approccio dei robot A,B,C alla stazione di ricarica in base alla loro posizione di partenza ...	60
Figura 10 Settore circolare in cui si può verificare una collisione con raggio R_c	61
Figura 11 Rappresentazione grafica dei kpi influenzati da variabili con influenza alta	69
Figura 12 Rappresentazione grafica dei kpi influenzati da variabili con influenza media	72
Figura 13a Rappresentazione grafica dei kpi influenzati da variabili con influenza bassa	76
Figura 14b Rappresentazione grafica dei kpi influenzati da variabili con influenza bassa	77
Figura 15 Relazione tra indici rispetto al task time	78
Figura 16 Relazioni indici rispetto al throughput	78

Indice delle tabelle

Tabella 1 Struttura per la descrizione del KPI	20
Tabella 2 Elenco indici di performance	24
Tabella 3 Task time	25
Tabella 4 cycle time	26
Tabella 5 travel time	29
Tabella 6 storage and retrieval time.....	31
Tabella 7 picking order time	31
Tabella 8 tempo di funzionamento.....	32
Tabella 9 tempo attesa e code	33
Tabella 10 tempo di ricarica della batteria.....	35
Tabella 11 tempo di accesso alla ricarica.....	36
Tabella 12 costo di investimento e gestione	36

Tabella 13 costo di gestione del personale.....	37
Tabella 14 costo di manutenzione.....	38
Tabella 15 costo di inventario.....	39
Tabella 16 inventory turnover.....	40
Tabella 17 coefficiente di utilizzo volumetrico	41
Tabella 18 coefficiente di utilizzo volumetrico	42
Tabella 19 spazio libero	43
Tabella 20 temperatura.....	44
Tabella 21 throughput	45
Tabella 22 bottleneck rate	46
Tabella 23 mean time between failure	47
Tabella 24 stock rotation.....	48
Tabella 25 utilizzo scaffali.....	49
Tabella 26 utilizzo medio risorse	50
Tabella 27 selettività	51
Tabella 28 ricettività	53
Tabella 29 consumo di energia	54
Tabella 30 picco di utilizzo	55
Tabella 31 numero agv.....	57
Tabella 32 efficacia nel riconoscimento degli item	58
Tabella 33 autonomia della batteria	59
Tabella 34 numero collisioni.....	62
Tabella 35 traffico presente nel magazzino	63
Tabella 36 Variabili con influenza alta	66
Tabella 37 Variabili con influenza media	70
Tabella 38 variabili con influenza bassa	76
Tabella 39 KPI maggiormente influenzati	77

1 INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi tratta l'analisi dei principali KPI (Key Performance Indicators) utilizzati per il miglioramento e l'implementazione delle prestazioni dei magazzini automatici (Automated Warehouse Systems), i quali si sono diffusi negli ultimi anni come alternativa ai magazzini tradizionali con il fine di poter utilizzare dei sistemi informatizzati che hanno permesso di ottimizzare la gestione degli stessi.

L'obiettivo è stato quello di studiare gli indici che sono maggiormente utilizzati negli AWS, facendo riferimento a quelli analizzati in letteratura, e di classificarli secondo la struttura descrittiva definita per la rappresentazione dei KPI nella norma ISO 22400. Successivamente, dopo aver ricavato una formula matematica per ogni singolo indice, è stato possibile studiare quali fossero le variabili che hanno un maggiore impatto sulle performance del magazzino, quali fossero gli indici maggiormente influenzati da queste e quelli per i quali è necessario porre maggiore attenzione per l'ottimizzazione dei risultati.

La scelta dei papers a cui si è fatto riferimento per l'analisi degli indici è stata effettuata basandosi su due criteri: uno qualitativo e un altro randomizzato. In seguito, si è passati alla selezione degli indici maggiormente citati per i quali è stato svolto anche uno studio delle frequenze assolute, relative e medie: i KPI scelti sono stati quelli che hanno evidenziato le frequenze maggiori.

Infine, è stata svolta l'analisi delle interazioni tra gli indici e le variabili. Grazie a quest'ultima è stato possibile mettere in evidenza come quelle che maggiormente influenzano le performance del magazzino sono quelle relative ai tempi di svolgimento delle diverse operazioni che sono svolte all'interno dei magazzini.

La struttura dell'elaborato si articola in 6 capitoli, preceduti da uno introduttivo; nell'ordine: capitolo 2, presenta la descrizione delle principali tipologie di magazzini automatici; capitolo 3, contiene la descrizione della norma ISO 22400 e la descrizione di come sono sviluppati tutti gli indici; capitolo 4, presenta l'analisi dei KPI; capitolo 5, analizza le relazioni che si sono create tra le variabili e tutti i KPI e valuta quali siano quelli maggiormente influenzati; capitolo 6, presenta le conclusioni del presente lavoro e alcuni spunti per eventuali lavori futuri.

2 DESCRIZIONE MAGAZZINI AUTOMATICI

Il magazzino, o centro di distribuzione, è una struttura logistica che permette di stoccare i prodotti e regolare il flusso delle merci sia in entrata che in uscita. È composto dalle attrezzature di movimentazione e stoccaggio e dalle risorse sia umane che gestionali.

Si possono identificare cinque processi principali svolti al suo interno: ricezione, stoccaggio, prelievo, unione delle parti e invio. Il primo prevede l'arrivo dei prodotti in magazzino e può prevedere un successivo packaging in containers diversi a seconda delle necessità dell'azienda. Successivamente, tramite lo stoccaggio, si posizionano gli items negli appositi spazi in cui il prodotto rimane fino alla spedizione. Le operazioni di prelievo e unione consistono rispettivamente nell'estrazione del prodotto una volta ricevuto l'ordine con successiva collocazione dello stesso in contenitori adibiti allo stoccaggio e nell'unione e composizione di nuovi containers (pallets). Infine, il processo di spedizione si occupa di inviare gli ordini combinati ai clienti. (Roelef Hamberg, 2012)

La gestione delle operazioni può risultare molto faticosa e ha un ruolo molto importante al fine di evitare inefficienze che possano riflettersi su tutto il processo produttivo. (Bevilacqua, 2019)

Sono necessari spazi ampi per poter ottimizzare la movimentazione degli stock e le manovre dei carrelli, caricare e scaricare il carrello e i containers, suddividere gli item negli scaffali, esaminare gli ordini selezionati. Generalmente l'operazione che richiede i maggiori costi e forza lavoro, che sia disposta a lavorare in turni, è il prelievo degli ordini. Inoltre, anche la disponibilità di terreni per gli ampliamenti si è ridotta e molti magazzini hanno la necessità di lavorare 24h/7d. (Kaveh Azadeh, 2019)

Un ulteriore fattore da considerare è la crescita della domanda nello shopping online, guidata dalla continua ricerca di prodotti che abbiano un costo inferiore e dei tempi di consegna ridotti. (Qian Wang, 2010)

In questo contesto, negli anni, si è sviluppata la necessità di trovare una soluzione che apportasse dei miglioramenti nella gestione globale dei magazzini e si è approdati ai magazzini automatici, detti Automated Warehouse Systems (AWS), i quali permettono lo stoccaggio e il prelievo dei prodotti nelle aziende di produzione e distribuzione. (Didem Cinar, 2016) Questi sono stati inseriti fin dagli anni '50 e hanno permesso una crescita considerevole delle performance nelle aziende che hanno deciso di impiegarli, sia grazie ai miglioramenti interni all'organizzazione che all'impatto positivo che hanno avuto sui rapporti coi clienti. Sono una parte fondamentale della logistica, la quale comprende il trasporto, lo stoccaggio, la distribuzione e la gestione generale. (Qian Wang, 2010), (Pei Guang Wang, 2013), (Alejandro Mollá-Descals, 2009)

I vantaggi principali sono visibili nella riduzione di spazi necessari e nel minor numero di errori umani commessi; si ottengono dei buoni risparmi sul costo del lavoro, aumenta l'affidabilità, la qualità dei prodotti è preservata e sono ridotti i tempi di processo. (Kees Jan Roodbergen, 2009), (Manisha Suresh Pingale, 2019) Permettono, quindi, di raggiungere un livello di tecnologia avanzato nella gestione del magazzino e di ottenere dei benefici economici considerevoli. Tuttavia, tutti questi fattori non risultano facili da implementare all'interno dell'azienda: ottimizzare la posizione dei prodotti nei magazzini è uno dei punti fondamentali affinché questi benefici possano essere ottenuti, in quanto permette di ridurre le distanze da percorrere per il prelievo. (Zhao, 2009), (Pei Guang Wang, 2013) L'automazione, in particolare, ha ridotto del 55% le spese operative in quanto ha permesso di migliorare le operazioni di raccolta dell'ordine. (Cechim, 2019) Gli svantaggi, invece, sono relativi alla flessibilità ridotta e ai maggiori costi di investimento. (Kees Jan Roodbergen, 2009)

La corretta gestione dei magazzini risulta fondamentale per evitare che eventuali errori, svolti in questa fase, si ripercuotano durante l'intero processo di raccolta di materiali causando sprechi di tempo e azioni correttive non a valore aggiunto. La fase più critica nella catena delle operazioni svolte all'interno degli AWS risulta essere quella del trasporto dal punto di prelievo al punto di consegna, seguita dalla fase di ricerca e da quella di raccolta dei componenti. Per questi motivi è molto importante che il magazzino sia ben organizzato con l'obiettivo di evitare o ridurre sprechi che porterebbero ad alti costi di gestione. (Bevilacqua, 2019)

2.1 Tipologie di magazzini automatici

Al momento sono presenti diverse tipologie di magazzini automatici: gli automated storage and retrieval system (AS/RS), gli automated guided vehicles (AGV), i vertical lift modules and caroselli e gli automated guided vehicle and retrieval systems (AGV/RS). [Figura 1]

Gli automated storage and retrieval system (AS/RS) sono costituiti da una struttura di stoccaggio (rack), un trasloelevatore (stacker crane), un raccoglitore a rulli (conveyor), un carrello elevatore (forklift truck) e un sistema di gestione e controllo informatizzato. In questo sistema i storing pallet e la struttura di stoccaggio sono fissi. Si possono trovare tre diverse tipologie di AS/RS: singola profondità, doppia profondità e multi-profondità; queste sono scelte a seconda della tipologia di prodotti stoccati nel magazzino e della tecnologia a cui si fa riferimento. (Manisha Suresh Pingale, 2019), (Degiovanni, 2019) Ricevuto l'ordine, lo si inserisce nel sistema informativo il quale fa in modo che il trasloelevatore prelevi il pallet dalla stazione in cui era stato stoccato e lo trasporti fino al sistema di rulli dal quale viene poi prelevato con il carrello elevatore. (Didem Cinar, 2016) Tra i principali vantaggi di questo sistema si

hanno: la riduzione degli spazi ottenuta grazie allo sviluppo verticale della struttura, il miglioramento del flusso dei materiali e il controllo delle scorte. (Didem Cinar, 2016), (Manisha Suresh Pingale, 2019), (Patvichaichod, 2019)

Questi sistemi possono essere ottimizzati (nel migliore dei modi) quando si effettuano sia una buona progettazione della struttura che una buona progettazione della gestione del sistema. (Didem Cinar, 2016)

Gli automated guided vehicle (AGV) sono dei sistemi utilizzati nei magazzini, nei centri di distribuzione e negli impianti produttivi per la movimentazione dei prodotti, sia lotti unici che insiemi di prodotti di ridotte dimensioni. Utilizzano sistemi di guida smart e dei sistemi di controllo che permettono di prevenire collisioni e definire il percorso che il macchinario dovrà seguire anche se questo non si trova nelle immediate vicinanze.

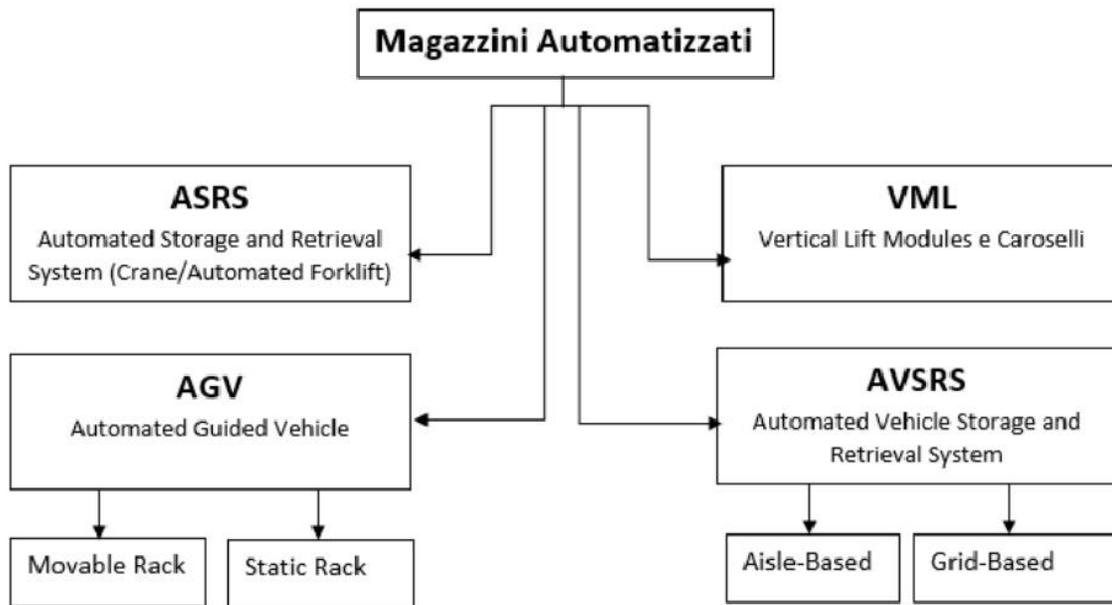


FIGURA 1 SCHEMA TIPOLOGIE AWS (DEGIOVANNI, 2019)

Le unità costitutive degli automated guided vehicle sono: l'unità di trasmissione, i robot, i pod di inventario e le stazioni di lavoro. Sono suddivisi in due architetture principali: hardware e software. Il primo presenta tutte le parti che compongono la struttura dell'AGV (come motore e parti elettroniche), il secondo invece permette di fornire al macchinario tutte le informazioni di gestione, navigazione e orientamento. (Degiovanni, 2019)

Permettono di ridurre l'accumulo di materiali che si crea spesso a ridosso dei raccoglitori a rulli e dei nastri. (Degiovanni, 2019), (Kirsch, 2011) Ulteriori vantaggi sono l'aumento della sicurezza dei lavoratori, la riduzione del costo dell'energia, l'aumento dell'efficacia. Gli svantaggi del sistema sono, invece, i costi di installazione, i lunghi tempi richiesti per la loro implementazione, la necessità di migliorare la sensibilità e capacità di orientamento degli AGV al fine di garantire la sicurezza all'interno della supply chain. È necessario evitare le collisioni tra veicoli e con persone o altri macchinari per non incorrere in interruzioni della produzione o blocco del sistema AGV. (Guilherme T. Aguiar, 2019), (Qin Li, 2016), (Santos J., 2016)

I vertical lift modules and caroselli (VLM) consistono in (delle) strutture composte da due colonne nelle quali è posizionato un estrattore meccanico che si muove tra i ripiani per stoccare o prelevare automaticamente i vassoi nei quali sono contenuti i prodotti. Questa tecnica permette di ottenere un'elevata produttività in quanto l'operatore rimane in un punto fisso e può occuparsi di svolgere altre operazioni mentre il vassoio è in arrivo. (Degiovanni, 2019)

Alcuni dei vantaggi di questi sistemi sono: alta densità di stoccaggio e massimizzazione degli spazi utilizzati, prelievo automatizzato che permette di ottenere una buona ergonomia e un alto livello di sicurezza per i dipendenti.

Gli automated vehicle storage and retrieval systems [Figura 2] consistono in un'alternativa agli AS/RS (crane based). I componenti principali sono: i veicoli autonomi, l'ascensore, un sistema di binari che permette il passaggio dei veicoli nelle corsie e la scaffalatura in cui vengono depositi i pallet con i prodotti. I primi si occupano di eseguire i movimenti orizzontali sugli assi x e y e di trasportare i pallet dall'ascensore alla zona di stoccaggio/ricevimento; si muovono tra le corsie sfruttando i binari trasversali: una zona di stoccaggio presenta scaffalature su ambo i lati, divise da una corsia centrale (aisle). (D. Roy, 2009), (Roy, 2015) Il magazzino si compone di più corridoi che possono contenere un'unica unità di stoccaggio o multiple. I veicoli possono essere utilizzati su un unico livello o su più livelli a seconda che si scelga una configurazione tier captive oppure tier-to-tier; la prima prevede che ci sia un veicolo per ogni livello, la seconda, invece, ha un numero di livelli maggiore rispetto al numero di veicoli, i quali si spostano, grazie all'elevatore, da uno all'altro a seconda dei prelievi da effettuare. (D. Roy, 2009), (Eder, 2020), (Roy, 2015)

Sono presenti dei punti di carico/scarico nella zona centrale del corridoio, così da dividerli in due segmenti uguali con lo scopo di minimizzare la distanza da percorrere per depositare il pallet/prodotto caricato dai veicoli autonomi. L'unità di elevazione è composta da più elevatori che trasportano i pallet tra i livelli del magazzino; ogni elevatore può trasportare un pallet alla volta, ma contemporaneamente

possono essere trasportati più pallet da diversi elevatori per ottenere una maggiore capacità di trasporto e dei tempi ciclo inferiori. (Roy, 2015)

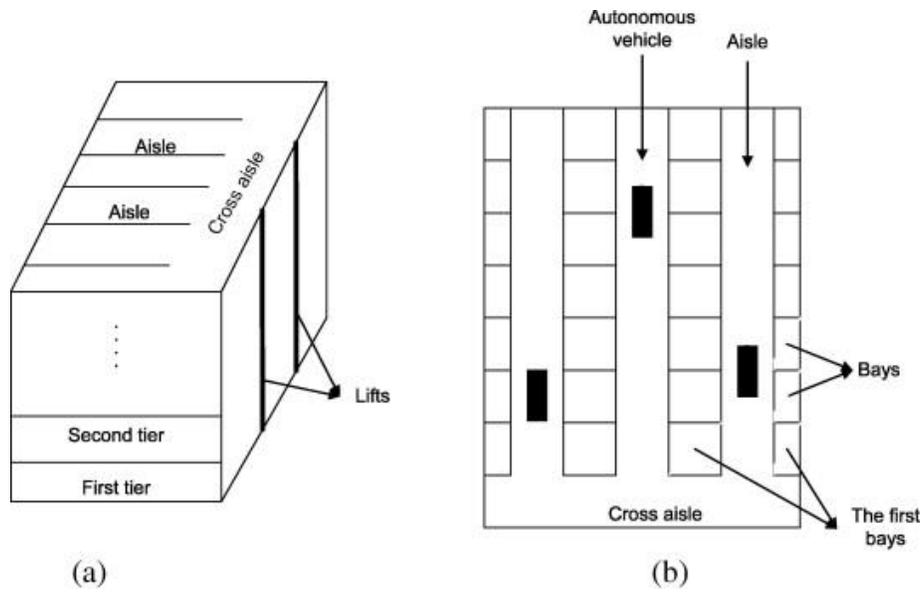


FIGURA 2 RAPPRESENTAZIONE DI UN SISTEMA AVS/RS (EKREN, 2011)

3 DESCRIZIONE NORMA ISO 22400

Il termine ISO (International Organization for Standardization) è utilizzato per indicare l'Organizzazione Internazionale per la Normazione, la quale ha lo scopo di definire norme relative alla gestione e alla certificazione della qualità riconosciute a livello mondiale che non operano all'interno di un settore specifico, ma riguardano diversi ambiti (es. alimentare, gestione, sicurezza informazioni).

Le lingue ufficiali da essa riconosciute sono l'inglese, il francese e il russo. Partecipano all'ISO gli enti di 162 stati, l'Italia ne fa parte tramite la rappresentanza dell'UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione).

Tutte le norme hanno un nome composto da un formato standard: ISO seguito dal numero della norma, dall'anno in cui essa è stata attivata e da un breve titolo descrittivo. Rappresentano un documento in cui sono definite le caratteristiche e gli standard che devono essere rispettati durante un procedimento o nella creazione di un prodotto o servizio.

Possono assumere diverse denominazioni a seconda del contesto in cui questa è utilizzata (internazionale, europeo, nazionale):

- ISO nel caso in cui la norma sia riconosciuta a livello internazionale;
- EN nel caso in cui sia una norma riconosciuta in europea;
- UNI nel caso in cui sia una norma di riscontro nazionale.

Nel caso in cui una norma sia utilizzata in più di uno tra questi tre contesti il suo nome presenterà tutte le denominazioni sopra. (Accademy, 2019)

La norma di riferimento per questo lavoro di ricerca è la ISO 22400, il quale titolo è: "Automation systems and integration- Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management". (Zhu, 2017)

La struttura si divide in quattro parti:

- i. Overview, esplicazione dei concetti fondamentali e della terminologia;
- ii. Definizioni e descrizioni
- iii. Utilizzo
- iv. Relazioni e dipendenze tra gli indici

La norma tratta indici di performance che siano strategici e quantificabili per poter effettuare uno studio sui fattori critici di un business e mirare ad un loro miglioramento con l'obiettivo di ridurre gli sprechi e di soddisfare gli obiettivi aziendali.

La norma ISO 22400 esegue uno studio degli indici relativi alla gestione delle operazioni di produzione (MOM) definite secondo uno standard internazionale (IEC 62264), in cui sono specificate le relazioni

gerarchiche tra le funzioni che si svolgono all'interno di un'impresa manifatturiera. Nello specifico, le funzioni sono suddivise in 4 livelli: pianificazione della logistica e il business plan (livello 4), gestione e controllo della produzione (livello 3), organizzazione della produzione in lotti, continua o discreta (livello 1 e 2) ed effettivo processo produttivo (livello 0). [Figura 3]

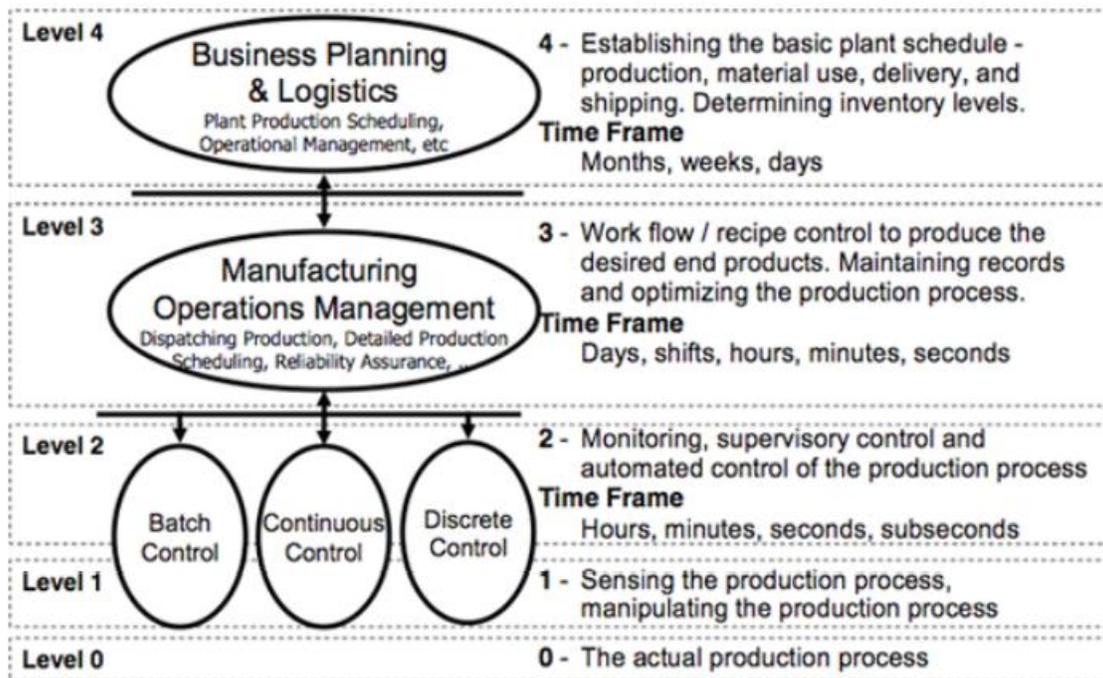


FIGURA 3 LIVELLI ELABORATI NELLA NORMA IEC 62264 (ZHU, 2017)

Gli indici elaborati nella norma ISO sono quelli estrapolati a livello 3, ovvero quelli relativi ai flussi di lavoro necessari per la produzione del prodotto finale nel rispetto dell'ottimizzazione dei processi produttivi. L'intervallo di tempo a cui fanno riferimento è: giorni, turni, ore, minuti e secondi.

In questo lavoro di tesi, per la descrizione degli indici è stata utilizzata la stessa struttura della norma, la quale viene sviluppata seguendo lo schema rappresentato nella Tabella 1.

Gli elementi descritti per ciascun KPI sono:

- Name: nome del KPI;
- ID: prevede una descrizione che identifichi il KPI nel contesto in cui è utilizzato;
- Description: prevede una breve descrizione dell'indice;
- Scope: valuta quali siano gli elementi per cui il dato indice è rilevante tra work unit, work center o production order, product o personnel;

- Formula: rappresenta la formula matematica con cui il KPI può essere calcolato;
- Unit of measure: è l'unità di misura secondo la quale il KPI è espresso;
- Range: esprime i limiti logici entro cui deve trovarsi il valore ottenuto;
- Trend: permette di valutare quali sia il set di valori che rendono un indice più o meno efficiente a seconda del valore ottenuto tramite il calcolo;
- Timing: indica la frequenza con cui il KPI deve essere calcolato. Può essere in tempo reale (ogni volta che si acquisiscono dati nuovi), su domanda (ogni volta che si ottengono dei dati specifici) o periodicamente (cioè analizzato in un determinato intervallo di tempo);
- Audience: indica coloro a cui l'indice è utile per lo svolgimento delle proprie operazioni. Le figure da informare possono essere l'operatore, ovvero il diretto responsabile della produzione, il supervisore, ovvero colui che è responsabile per le attività degli operatori, e il management, ovvero il personale responsabile di tutta la gestione aziendale;
- Production methodology: esprime la tipologia di produzione a cui l'indice trattato si adatta meglio tra produzione discreta, produzione per lotti e produzione continua;
- Effect model diagram: è una rappresentazione grafica che evidenzia le dipendenze tra gli elementi dei KPI, le quali possono essere utilizzate per approfondire e comprendere il valore degli elementi utilizzati negli indici;
- Notes: serve per inserire informazioni più dettagliate relative all'indice di performance.

Una volta effettuata la valutazione dell'indice, poiché questo da solo potrebbe non fornire una descrizione che permetta di sfruttarlo al meglio nelle decisioni gestionali, generalmente si inserisce una soglia critica (o valore di riferimento) che fornisca una guida alla valutazione e comprensione del risultato ottenuto dal suo calcolo.

Questa tesi ha l'obiettivo di studiare gli indici di performance relativi ai magazzini automatici; per tale motivo non sono state descritte le ultime tre voci della tabella: production methodology, effect model diagram e notes. In particolar modo, "production methodology" si riferisce ad aspetti prettamente correlati con la fase di produzione dell'unità. Prevede, infatti, una scelta tra produzione discreta, per lotti o continua, ma questa differenziazione non ha un impatto sulla fase di immagazzinamento delle unità che avviene a valle del completamento della produzione.

Per quanto riguarda la voce "effect model diagram", si è deciso di eseguire un'analisi più approfondita delle correlazioni presenti tra tutti gli indici. Pertanto, non sarà presente nella descrizione del singolo indice, ma verrà analizzata nel capitolo 5 di questo lavoro.

Infine, si è preferito non inserire la voce “notes” internamente alla tabella in quanto ogni indice presenta una descrizione specifica con tutte le informazioni che lo riguardano, le quali offrono una visione approfondita di ogni singolo KPI. (Zhu, 2017)

KPI Description	
Content:	
Name	
ID	
Description	
Scope	
Formula	
Unit of measure	
Range	
Trend	
Context:	
Timing	
Audience	
Production methodology	
Effect model diagram	
Notes	

TABELLA 1 STRUTTURA PER LA DESCRIZIONE DEL KPI

4 ANALISI INDICI DI PERFORMANCE

Gli indici di performance (Key Performance Indicators) sono degli indicatori che permettono di valutare le prestazioni e i risultati dell'azienda con l'obiettivo di poterli incrementare e di aumentare l'efficienza della gestione delle operazioni svolte. In un ambiente competitivo come quello odierno, avere una chiara visione dei punti di forza dell'azienda permette di raggiungere gli obiettivi interni nel migliore dei modi e di mantenere una posizione di vantaggio all'interno del settore nel quale si opera.

In questo lavoro di tesi saranno analizzati gli indici di performance che maggiormente influiscono nella creazione dei magazzini automatici e nelle scelte strategiche di ogni azienda che decida di adottare questa tipologia di struttura.

4.1 Scelta degli indici di performance

I KPI che verranno discussi sono stati scelti dopo aver eseguito un'attenta analisi di numerosi studi scientifici presenti in letteratura individuati nel database Scopus inserendo sotto la voce "TITLE" i termini autom e warehouse che hanno permesso di individuare degli articoli relativi ai magazzini automatici e automatizzati. Dopo aver effettuato un'analisi degli abstract di tutti i file, si è deciso di restringere il focus sul titolo per poter scartare quelli che non presentavano informazioni sufficienti per lo studio degli indici di performance. Sono stati dunque individuati 499 articoli.

Un'ulteriore selezione è stata effettuata grazie a due diversi criteri: qualità dei lavori e selezione randomizzata. [Figura 4]

Il primo ha permesso di selezionare 113 lavori e prevede che sia rispettato uno tra i tre requisiti elencati di seguito:

- L'articolo deve essere pubblicato in un giornale che sia stato classificato come Q1 o Q2;
- L'articolo deve essere pubblicato in un giornale con un indice Scimago Journal Ranking (SJR) maggiore di 0,5;
- L'articolo deve essere stato citato almeno 14 volte.

Il secondo, invece, ha permesso di selezionare 123 articoli tra quelli rimanenti tramite un campionamento casuale.

Infine, dal campione totale di 236 papers sono stati esclusi quelli che non era possibile elaborare, in quanto non presentavano una traduzione in inglese o non erano reperibili, e quelli che non trattavano come argomento i magazzini automatici, ritenuti dunque non correlati all'argomento di interesse di questo lavoro.

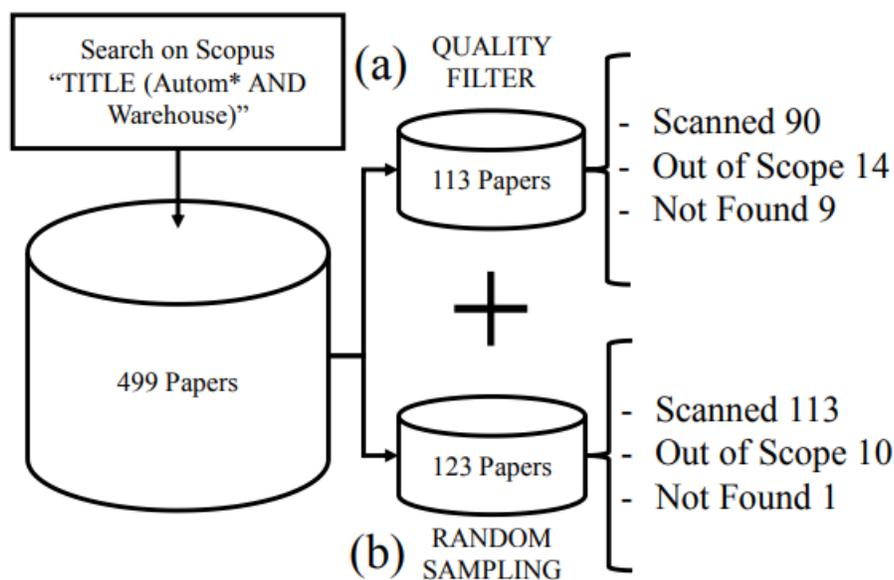


FIGURA 4 SCHEMA IDENTIFICATIVO DELLA METODOLOGIA DI SELEZIONE DEGLI ARTICOLI (FAVETO A., 2020)

Il numero finale di lavori analizzati è stato, dunque, 203 (ovvero il 40% del totale individuato inizialmente); di questi 90 sono stati individuati tramite il criterio qualitativo, 113 grazie alla selezione randomizzata.

Il campione considerato ha portato alla selezione di 72 indici per i quali sono state calcolate la frequenza relativa (data dal rapporto tra il numero di ricorrenze dell'indice e il numero totale degli articoli), la frequenza pesata (calcolata come il rapporto tra il numero di citazioni per l'articolo i-esimo in cui è presente l'indice e il totale degli articoli) e la frequenza globale (ottenuta dalla media delle due precedenti). (Faveto A., 2020)

Successivamente, sono stati individuati i KPI relativi direttamente alle performance dei magazzini automatici, scartando quelli che non avevano un'influenza diretta sulla sua organizzazione e ottimizzazione (ad esempio la presenza di polvere e sporco) e quelli il quale studio era possibile solo a livello qualitativo. Infatti, per poter valutare gli indici secondo la norma ISO 22400 è condizione necessaria che questi siano esprimibili tramite formula matematica. Questo ha portato alla riduzione del numero degli indici a 33, ovvero il 46% del campione iniziale.

Infine, i KPI sono stati suddivisi in cinque categorie [Tabella 2] a seconda della tipologia di risultato che permettono di controllare e ottimizzare e sono stati analizzati secondo lo standard della norma ISO 22400.

Gli indici scartati dai 72 iniziali, sono brevemente descritti nel capitolo conclusivo di questo lavoro e potranno rappresentare la base per lavori successivi.

Le cinque categorie sono:

- **Tempo:** sono indici che forniscono informazioni necessarie per l'ottimizzazione e la gestione dei tempi che hanno un impatto sulle attività svolte all'interno del magazzino;
- **Economici:** sono inseriti in questa categoria tutti i KPI relativi ai costi che si verificano nella creazione e implementazione delle operazioni che permettono il funzionamento dell'intera zona di stoccaggio;
- **Ambientali:** in questa categoria si trovano gli indici di coefficiente volumetrico e superficiale e quello di capacità del magazzino. Sono utili in fase di creazione del layout del magazzino per capire quali siano gli spazi necessari per uno svolgimento ottimale delle operazioni di gestione del magazzino, di carico/scarico delle unità e di spostamento dei veicoli e del personale. Inoltre, sono inseriti gli indici di spazio libero, utile come guida sia per la movimentazione dei veicoli che per l'ottimizzazione degli spazi, e quello relativo alla temperatura, la quale deve essere costantemente controllata per preservare la qualità dei prodotti stoccati.
- **Qualità:** sono contenuti in questa categoria gli indici che hanno lo scopo di fornire informazioni relative all'efficacia della gestione delle performance del magazzino grazie alla valutazione di aspetti quali il throughput, l'errore medio, la rotazione delle unità nel magazzino, il picco di utilizzo, la ricettività e la selettività. Grazie a questi indici è possibile ottimizzare le performance tecniche del magazzino.
- **Efficienza AGV:** i KPI descritti in questa categoria valutano il numero di veicoli ritenuto ottimo per ottenere una gestione efficace delle unità, il numero di collisioni che si possono verificare durante il trasporto delle unità di carico da una postazione ad un'altra, l'autonomia della batteria e la rapidità da parte di un robot di riconoscere l'item da prelevare. Sono tutti indici che permettono di gestire nel migliore dei modi il funzionamento dei veicoli automatici.

TEMPO	<ul style="list-style-type: none"> Task Time Cycle Time Travel time Storage Time Picking Orders Time Tempo Funzionamento Tempo Attesa e Code Tempo di Ricarica Tempo di Accesso alla Ricarica
ECONOMICO	<ul style="list-style-type: none"> Costi di Investimento e Gestione Costi Di Gestione del Personale Costo di Manutenzione del Magazzino Costo Inventario Inventory Turnover
AMBIENTALE	<ul style="list-style-type: none"> Coefficiente Utilizzo Volumetrico Coefficiente di Utilizzo Superficiale Spazio libero Temperatura
QUALITA'	<ul style="list-style-type: none"> Throughput Bottleneck Rate Errore Medio Stock Rotation Utilizzo Scaffali Utilizzo medio risorse Selettività Ricettività Consumo di Energia Picco di Utilizzo
EFFICIENZA AGV	<ul style="list-style-type: none"> Numero dei Veicoli Efficacia nel Riconoscere gli Item Autonomia Batterie veicolo Numero Collisioni Traffico presente nel magazzino

TABELLA 2 ELENCO INDICI DI PERFORMANCE

4.1.1 Indici di tempo

4.1.1.1 Task time

Il task time (T_{s_i}) è il tempo necessario per completare un'operazione in un dato scaffale.

Lo si calcola come:

$$T_{s_i} = \sum_{k=1}^K (T_n^{(k)} + V_n^{(k)} + P_i^{(x)}) \quad [42]$$

Dove K è il numero di task preassegnati. $T_n^{(k)}$ è il tempo stimato per il trasporto dallo scaffale n alla stazione nella quale il task k è eseguito. $P_i^{(x)}$ è il tempo necessario per selezionare ed estrarre l'item stimato per l'estrattore del task k nella stazione di riferimento (retrival time). $V_n^{(k)}$ è calcolato come il prodotto tra la velocità di estrazione dell'item e il numero di item da eseguire nel task k. (Amato F., 2005)

KPI Description	
Content:	
Name	Task time
ID	
Description	Il task time (T_{s_i}) è il tempo necessario per completare un'operazione in un determinato scaffale.
Scope	Work unit, production, product
Formula	$T_{s_i} = \sum_{k=1}^K (T_n^{(k)} + V_n^{(k)} + P_i^{(x)})$ (Amato F., 2005)
Unit of measure	Minuti
Range	0-minuti massimi per lo svolgimento dell'operazione
Trend	Più basso è, meglio è
Context:	
Timing	Periodicamente, su richiesta
Audience	Supervisore, management, lavoratore

TABELLA 3 TASK TIME

4.1.2 Cycle time

Un altro indicatore di performance fondamentale è il cycle time, il quale permette di calcolare il tempo totale necessario per portare a compimento un'operazione. Serve considerare alcuni fattori per poter analizzare quale sia il tempo totale richiesto per lo svolgimento di un'operazione di carico/scarico. Questi sono: la velocità con la quale si muovono gli AGV (possono muoversi con accelerazione lineare fino a

quando non si raggiunge una velocità massima oppure con velocità costante); il rispetto delle distanze di sicurezza dagli altri veicoli con lo scopo di evitare collisioni; i tempi di sosta presso le zone di carico/scarico. (Liu, 2018) Per tutti questi motivi, il cycle time deve essere calcolato come la somma del travel time più tutti i tempi necessari per svolgere le azioni elencate i quali variano di situazione in situazione a seconda dell'organizzazione interna delle aziende, come per esempio il numero di AGV che si decide di inserire nel magazzino.

$$CT = t_e + W_x + t_{c/s} + T_{s_i} + TT$$

Dove: t_e è il tempo di elaborazione dell'informazione quando l'AGV la riceve, W_x è il tempo di attesa in coda, $t_{c/s}$ è il tempo di carico/scarico del pallet, T_{s_i} è il tempo richiesto per il completamento delle missioni.

KPI Description	
Content:	
Name	Cycle time
ID	
Description	Il cycle time permette di calcolare il tempo totale necessario per portare a compimento un'operazione di carico/scarico.
Scope	Work center
Formula	$CT = t_e + W_x + t_{c/s} + T_{s_i} + TT$
Unit of measure	Min, h
Range	
Trend	Più basso è, meglio è
Context:	
Timing	Su richiesta, in tempo reale
Audience	Supervisore, management, operatore

TABELLA 4 CYCLE TIME

In particolare, per il calcolo del tempo di attesa si possono moltiplicare la velocità di prelievo (v_p) per il numero di item (n_i) che devono essere prelevati in quel task k. (H. Yoshitake, 2019)

$$W_x = v_p * n_i$$

Dovranno essere utilizzati valori medi in quanto, come vedremo nell'indice relativo al calcolo dei veicoli, non si utilizza un unico AGV e questi avranno tutti delle tempistiche di lavoro diverse a causa delle diverse traiettorie e di problemi nei quali possono incorrere nel loro percorso.

In questa parte del sistema il collo di bottiglia è il robot che finisce per ultimo di svolgere le operazioni per cui è stato predisposto, motivo per cui si deve sempre puntare ad un'ottimizzazione di questi tempi "aggiuntivi" che, se non tenuti sotto controllo, possono causare inefficienze nella gestione del magazzino. (Kam Fai Elvis Tsang, 2018)

In aggiunta, serve considerare anche la dimensione del veicolo e dell'elevatore per valutarne la loro portata; il tempo d'attesa per la movimentazione dell'elevatore consiste in circa il 16-44% del cycle time. (Fukunari, 2009)

4.1.3 Travel time

Il travel time (TT) è l'indice che considera il tempo totale in cui l'AGV effettivamente si muove tra il punto di carico/scarico (storage table) dell'item e quello di input/output del trasportatore (conveyor), localizzato in ogni corsia. (figura 3)

Le due operazioni principali in questa fase sono, dunque, il prelievo del pallet dalla posizione in cui è stoccato e lo scarico nel buffer posto vicino al trasportatore.

Sainan Liu (Liu, 2018) ha creato un modello che si è posto l'obiettivo di minimizzare il tempo totale di completamento dei due task sotto tre ipotesi: il tempo nel quale si lavora con i pallet all'interno dei magazzini automatici è considerato deterministico; non si considera tempo di attesa degli AGV tra un task e l'altro; si trasporta un solo pallet alla volta e gli AGV si fermano nella zona in cui completano l'ultima operazione.

Stabilisce che la variabile t_{ij} è il tempo di esecuzione che intercorre tra due task consecutivi e la variabile c_{ij} , invece, rappresenta il tempo che intercorre tra i due task quando si ricorre all'utilizzo di un AGV. Indicando con V_i il travel time, nello studio, è stata impostata la funzione:

$$V_i = \sum_{i \in T} \sum_{j \in T} c_{ij} X_{ij}$$

Dove la variabile X_{ij} è uguale a 1 nel caso in cui $c_{ij} < t_{ij}$, in caso contrario è uguale a zero in quanto in quel caso la scelta di ricorrere ad un veicolo automatico non risulta essere opportuna.

Un altro metodo utilizzato è quello studiato da Khojasteh et al. (Khojasteh, 2016) i quali valutano il travel time considerando sia la distanza orizzontale che quella verticale che deve essere percorsa dal veicolo per poter prelevare l'item. (fig. 4) L'AGV si muove nello stesso momento sia in senso verticale che orizzontale e per questo hanno considerato come travel time il valore massimo tra quello orizzontale e quello verticale.

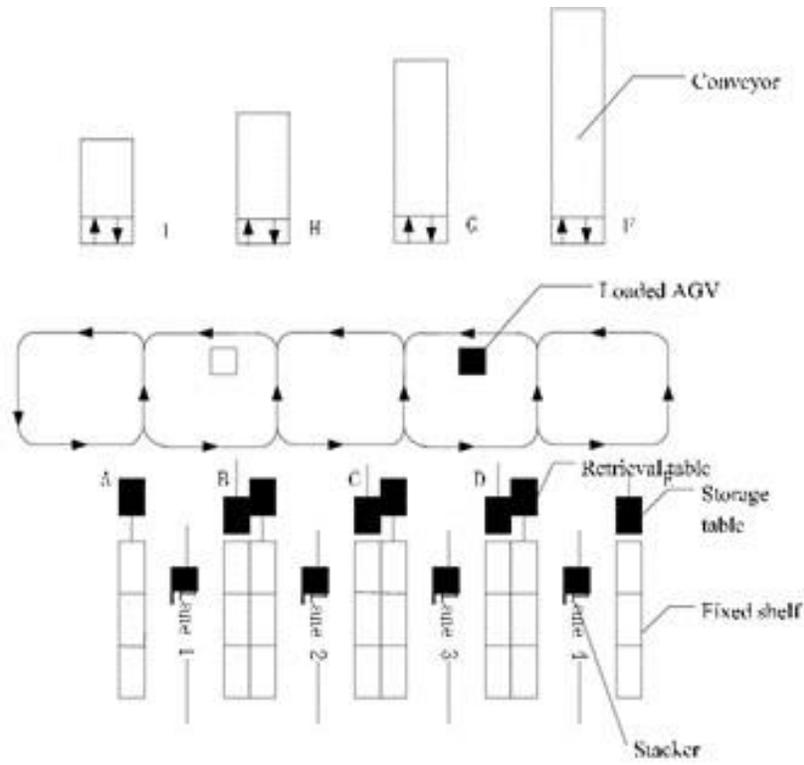


FIGURA 5 A GENERAL LAYOUT OF AUTOMATED WAREHOUSE SYSTEM (LIU, 2018)

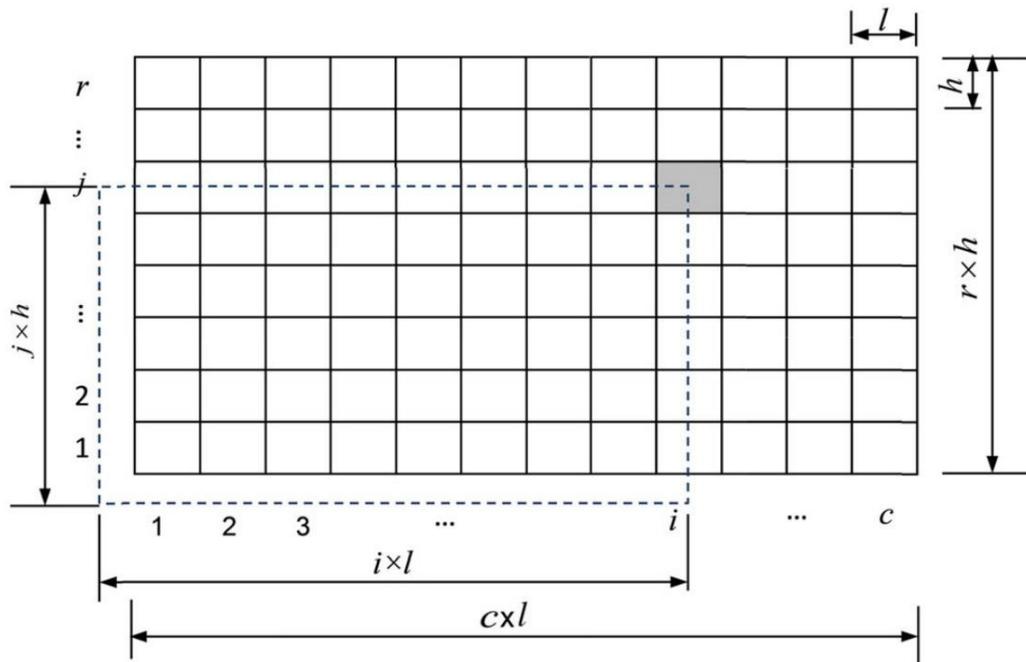


FIGURA 6 VISIONE FRONTALE DI UN MAGAZZINO CON R RIGHE E C COLONNE (KHOJASTEH, 2016)

La formula da loro ipotizzata negli spostamenti in un unico corridoio è:

$$TT = 2\max\left(\frac{dl}{v_h}, \frac{jh}{v_v}\right)$$

dove $\frac{dl}{v_h}$ è il travel time orizzontale in cui si ricorre infatti alla velocità con cui si muovono in orizzontale; viceversa $\frac{jh}{v_v}$ sono i valori relativi agli spostamenti verticali del veicolo.

Potrebbe però succedere che sia richiesto il prelievo di un item che è localizzato in corridoio diverso da quello in cui si trova il veicolo. In questo caso devono essere considerati anche altri fattori quali: il tempo richiesto per spostarsi orizzontalmente dal corridoio in cui si trova (c) al corridoio (c') in cui deve eseguire l'operazione (t1), il tempo di ingresso in quel corridoio muovendosi da quello precedente (t2) e il tempo di prelievo dell'unità (t3).

$$t_1 = \frac{cl}{v_h} + t_e; \quad t_2 = \frac{|a'-a|w}{v_h}; \quad t_3 = t_e + \frac{(c-i)l}{v_h}$$

Dove t_e è il tempo richiesto per l'uscita da un corridoio e l'ingresso nell'altro; l è la larghezza della postazione di stoccaggio; c è il numero di colonne e i indica il numero del corridoio in cui si trova l'unità.

In questo secondo caso il travel time sarà dato dalla somma dei tre tempi analizzati:

$$TT = t_1 + t_2 + t_3 + t_{ij}^a \quad [32]$$

KPI Description	
Content:	
Name	Travel time
ID	
Description	Il travel time (TT) è l'indice ottenuto calcolando il tempo totale in cui l'AGV effettivamente si muove tra il punto di carico/scarico (storage table) dell'item e quello di input/output del trasportatore (conveyor), localizzato in ogni corsia.
Scope	Work center, work unit
Formula	$TT = 2\max\left(\frac{dl}{v_h}, \frac{jh}{v_v}\right)$
Unit of measure	Min, h
Range	
Trend	Più basso è, minore è il tempo necessario
Context:	
Timing	Su richiesta, in tempo reale
Audience	Supervisore, operatore

TABELLA 5 TRAVEL TIME

4.1.4 Storage and retrieval time

Questo indice di performance è composto da due fattori diversi: il retrieval time e lo storage time. Il primo consiste nel prelievo dell'unità dal punto di stoccaggio fino al punto a cui avrà accesso l'AGV addetto al suo trasporto. Lo storage time, invece, consiste nel posizionare il pallet in un punto addetto allo stoccaggio delle unità che vengono poi caricate nelle posizioni di stoccaggio per loro riservate nel magazzino dalla forca del traslo elevatore. (Xie, 2009)

Lo storage time è calcolato con la seguente formula:

$$P_i^{(x)} = t_{p1} + T_n^{(k)} + 2t_f + t_a$$

Dove t_{p1} è il tempo impiegato dal carrello elevatore per spostarsi dalla posizione p_0 alla posizione p_1 (Fig.5); $T_n^{(k)}$ è il tempo per lo spostamento dalla posizione p_0 a quella p_2 ; t_f è il tempo necessario affinché la forca si sistemi per il prelievo; t_a è un tempo addizionale che viene tenuto in considerazione durante il processo di prelievo. (Lenoble N., 2018)

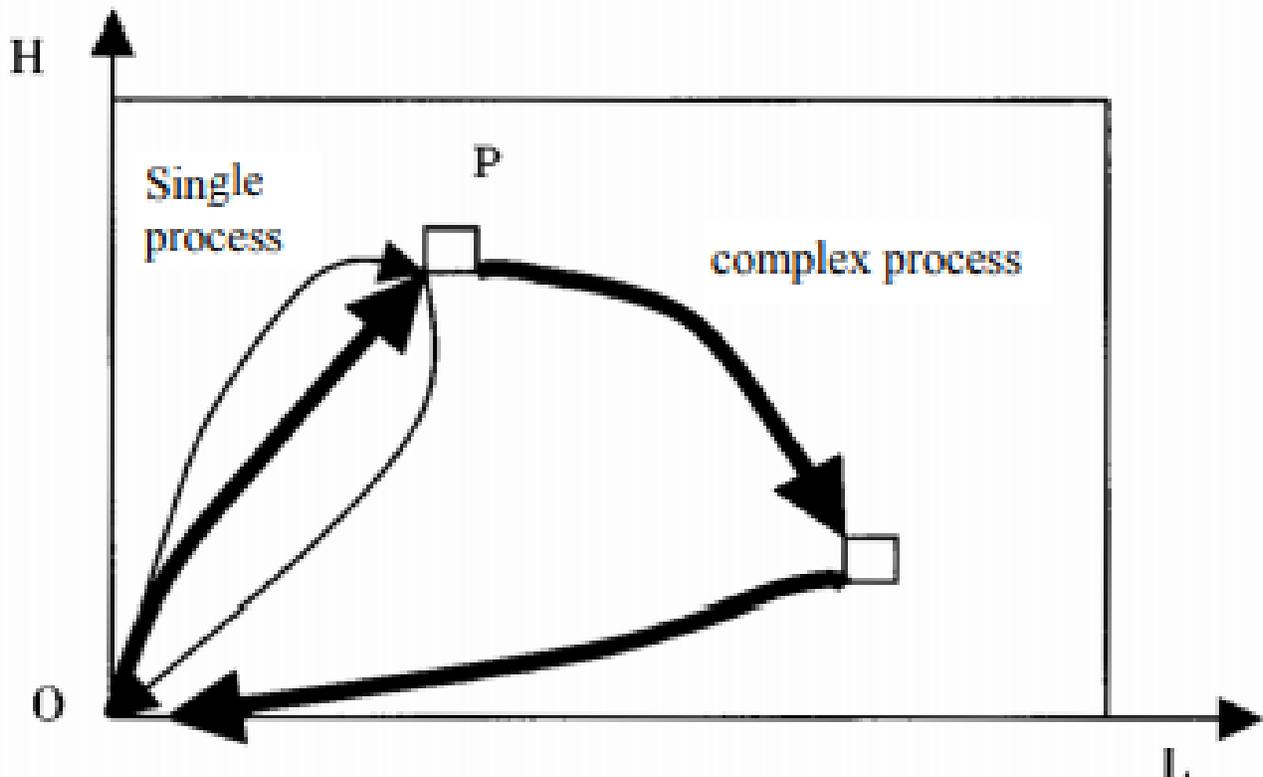


FIGURA 7 PROCESSO SINGOLO E COMPLESSO SVOLTO DAL TRASLO ELEVATORE (LENOBLE N., 2018)

KPI Description	
Content:	
Name	Storage and retrieval time $P_i^{(k)}$
ID	
Description	Lo storage time and retrieval time è il tempo necessario per l'estrazione o immissione dell'item dalla posizione in cui questo è stato stoccato.
Scope	Work unit, production, product
Formula	$P_i^{(x)} = t_{p1} + t_{p2} + 2t_f + t_a$ (Lenoble N., 2018)
Unit of measure	Minuti
Range	
Trend	Più basso è, maggiore è l'efficienza del sistema
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, management, lavoratore

TABELLA 6 STORAGE AND RETRIVAL TIME

4.1.5 Picking orders time

KPI Description	
Content:	
Name	Picking order time
ID	
Description	Il picking order time è il tempo che gli AGV impiegano per prelevare un item e portarli fino alla stazione di carico/scarico.
Scope	Work unit, product
Formula	Picking order time = $\frac{Dp}{v_h}$
Unit of measure	Tempo
Range	
Trend	Minore è il tempo, migliore è il risultato
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, lavoratore

TABELLA 7 PICKING ORDER TIME

Il picking orders time è il tempo necessario per portare l'item dal punto di prelievo al punto di carico/scarico; il veicolo si muove ortogonalmente lungo il corridoio tra questi due punti.

La formula utilizzata per il calcolo del picking order time:

$$PO = \frac{Dp}{v_h}$$

è data dal rapporto tra la distanza che deve essere percorsa dal veicolo per il prelievo e la consegna dell'item (Dp) e della velocità con cui l'AGV si muove (v_h). Si evince dunque una forte dipendenza tra il tempo richiesto per le operazioni di picking e la distanza tra i due punti di cui si è discusso.

È importante minimizzare il picking time in quanto questo permette di ottenere dei miglioramenti sull'intero sistema organizzativo dei magazzini. (Amato F., 2005)

4.1.6 Tempo funzionamento

Il tempo di funzionamento è il tempo che esprime quanti task possono essere svolti nell'unità di tempo.

La formula utilizzata è:

$$J_4 = CT * K \text{ (Kam Fai Elvis Tsang, 2018)}$$

Dove K è il numero totale di task e CT è il tempo totale necessario per terminare tutti i task il quale può anche essere espresso come cycle time.

KPI Description	
Content:	
Name	Tempo di funzionamento
ID	
Description	Il tempo di funzionamento è il tempo che esprime quanti task possono essere svolti nell'unità di tempo.
Scope	Work center
Formula	$J_4 = CT * K$ (Kam Fai Elvis Tsang, 2018)
Unit of measure	Minuti
Range	
Trend	Minore è, maggiore è l'efficienza
Context:	
Timing	Su richiesta, periodicamente
Audience	Supervisore, management

TABELLA 8 TEMPO DI FUNZIONAMENTO

4.1.7 Tempo di attesa e code

KPI Description	
Content:	
Name	Tempo attesa e code (W_x)
ID	
Description	Il tempo di attesa e code indica il tempo che un AGV deve attendere prima di poter effettuare un'operazione di prelievo.
Scope	Work unit, production, product
Formula	$W_x = \sum_{b=1}^B \sum_{lb \in K} W_{lb}$
Unit of measure	Minuti
Range	
Trend	Più basso è, maggiore è l'efficienza del sistema
Context:	
Timing	Periodicamente, su richiesta
Audience	Supervisore, management, lavoratore

TABELLA 9 TEMPO ATTESA E CODE

Il tempo di attesa e coda è un indice che permette di valutare quanto un robot deve stare in attesa davanti alla postazione prima di poter prelevare l'item.

Lo si calcola con la seguente formula:

$$W_x = \sum_{b=1}^B \sum_{lb \in X} W_{lb} \quad (\text{Yoshitake, 2019})$$

In cui W_{lb} è il tempo di attesa davanti ad ogni postazione. X è l'insieme di stazioni che devono essere visitate per il completamento dell'ordine; B è il numero di lotti da creare.

4.1.8 Tempo di ricarica della batteria

Come visto finora, il ruolo degli AGV è fondamentale per il funzionamento dei magazzini automatici. Per l'ottimizzazione del loro funzionamento è necessario stabilire come poterli ricaricare facilmente quando si scaricano, mirando a limitare il tempo totale di ricarica e il numero di spostamenti che i veicoli devono effettuare per accedere al punto di ricarica anche quando non sono presenti operatori umani a gestirli.



FIGURA 8 STAZIONE DI RICARICA IDENTIFICATA DAL TAG E ROBOT CON CILINDRI ADIBITI ALLA RICARICA (GENG, 2017)

Guangrui et al. hanno eseguito uno studio che prevede che i robot siano direttamente connessi con le stazioni di ricarica: queste sono posizionate in diverse zone del magazzino per facilitare l'accesso del robot quando ha necessità di eseguire una ricarica. Ogni postazione presenta un tag per essere identificata e riconosciuta dal veicolo e che lo guida nel corretto posizionamento nel momento in cui ha bisogno di effettuare la ricarica. È composta, inoltre, anche da tre piastre metalliche alle quali l'AGV si connette tramite tre cilindri metallici installati su di esso e che permettono un collegamento diretto con la sua batteria. Il robot, arrivato al punto di ricarica, si posiziona al meglio e procede alla ricarica grazie al contatto tra i cilindri e le piastre metalliche. (Fig.5) (Geng, 2017)

La formula che rappresenta il tempo di ricarica può essere espressa come:

$$TR = \frac{b^{full} - b_v^{current}}{cr} \quad (\text{Sunderesh S. Heragu, 2011})$$

In cui b^{full} è il livello massimo di carica della batteria, $b_v^{current}$ è il livello corrente della batteria e cr è il charging rate della stazione di ricarica.

Il tempo di ricarica può essere variabile in quanto dipende sia dagli ostacoli che l'AGV incontra per strada che dalla visibilità del tag da parte del veicolo. Nel caso in cui il tag sia ben visibile, il processo avviene facilmente e i tempi di ricarica sono veloci; al contrario, se il veicolo incontra degli ostacoli o

non riesce a visualizzare facilmente il tag il processo potrebbe durare di più in quanto il robot ha necessità di diverse operazioni di manovra per posizionarsi al meglio. Un ultimo fattore che influenza il tempo di ricarica è la distanza del robot dalla stazione: ovviamente, più è distante, maggiore è il tempo richiesto. (Fig.6) (Geng, 2017)

KPI Description	
Content:	
Name	Tempo ricarica
ID	
Description	Il tempo di ricarica della batteria è dato dal tempo necessario per portare la carica della batteria al suo livello massimo (b^{full}) a meno del livello di carica in cui si trova il robot ($b_v^{current}$), rapportato con il charging rate.
Scope	Work centre
Formula	$TR = \frac{b^{full} - b_v^{current}}{cr}$ (Sunderesh S. Heragu, 2011)
Unit of measure	time
Range	0-Tempo max di ricarica
Trend	Più basso è, meglio è
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, worker

TABELLA 10 TEMPO DI RICARICA DELLA BATTERIA

4.1.9 Tempo di accesso alla stazione di ricarica

Il tempo di accesso alla ricarica indica il tempo necessario per un AGV per poter raggiungere la stazione di ricarica più vicina rispetto alla posizione nella quale si trova.

Lo si può calcolare come:

$$T_r = \frac{a_{agv} - a_{sr}}{v_h}$$

Dove a_{agv} è la posizione dell'AGV nel momento in cui la batteria deve essere ricaricata, a_{sr} è la posizione della stazione di ricarica e v_h è la velocità orizzontale con cui il robot si muove all'interno del magazzino.

KPI Description	
Content:	
Name	Tempo di accesso alla ricarica
ID	
Description	Il tempo di accesso alla ricarica indica il tempo necessario per un AGV per poter raggiungere la stazione di ricarica più vicina rispetto alla posizione nella quale si trova.
Scope	Work center
Formula	$T_r = \frac{a_{agv} - a_{sr}}{v_h}$
Unit of measure	minuti
Range	
Trend	Più il tempo è ridotto, prima si ha la possibilità di ricaricare il robot
Context:	
Timing	Periodicamente
Audience	Supervisore, operatore

TABELLA 11 TEMPO DI ACCESSO ALLA RICARICA

4.2 Indici economici

4.2.1 Costi di investimento e gestione

KPI Description	
Content:	
Name	Costi di investimento e gestione
ID	
Description	I costi di investimento sono dati dalla somma di tutti i costi in cui si deve incorrere per la costruzione e gestione dei magazzini.
Scope	Product cost
Formula	$CT(inv) = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7$
Unit of measure	euro
Range	
Trend	Minore è il costo, meglio è
Context:	
Timing	In fase di costruzione
Audience	Management

TABELLA 12 COSTO DI INVESTIMENTO E GESTIONE

I costi di investimento sono dati dalla somma di tutti i costi in cui si deve incorrere per la costruzione e gestione dei magazzini. I costi principali sono: costo dei muri (C_1), costo struttura (C_2), costo del

trasportatore (C_3), costo dei buffer di input/output (C_4), costo delle fondamenta e tetto (C_5), costo del trasloelevatore (C_6), e costi ulteriori (C_7). Costo dei muri: è dato dal prodotto tra l'altezza dei muri e il costo di rivestimento per metro quadro. Costo struttura: è dato dal prodotto del volume (espresso in numero di pallets) e il costo per unità di acciaio. Costo trasportatore: è dato dal prodotto tra il numero di trasportatori e il costo di ognuno di questi. Costo dei buffer: è dato dal prodotto tra il costo della singola posizione per il numero di buffer. Costo delle fondamenta e tetto: è dato dal prodotto tra i costi di fondamenta e tetto per la lunghezza e la profondità. Costo del traslo elevatore: è dato dal costo per metro dell'elevatore per la profondità.

Il costo totale è ottenuto come:

$$CT (inv) = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 \text{ (Amato F., 2005)}$$

4.2.2 Costi di gestione del personale

Il costo di gestione del personale indica il salario annuale (S) corrisposto per coloro che si occupano di raccogliere gli item dai pallet per soddisfare gli ordini dei clienti. Viene attualizzato in base al numero di anni T e al discount rate.

Lo si calcola come:

$$C_p = \sum_{t=1}^T \frac{S}{(1+r)^t} \text{ (Amato F., 2005)}$$

KPI Description	
Content:	
Name	Costo gestione personale
ID	
Description	Il costo di gestione del personale indica il salario annuale attualizzato corrisposto per coloro che si occupano di raccogliere gli item dai pallet per soddisfare gli ordini dei clienti.
Scope	Product cost, worker, work unit
Formula	$\sum_{t=1}^T \frac{S}{(1+r)^t}$ (Amato F., 2005)
Unit of measure	euro
Range	
Trend	Più è basso, più il sistema è efficiente
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, management

TABELLA 13 COSTO DI GESTIONE DEL PERSONALE

4.2.3 Costo di manutenzione

Il costo di manutenzione è calcolato come una percentuale dei costi di investimento in cui si incorre per gli elevatori.

Questo indice può essere calcolato come:

$$C_m = \sum_{t=1}^T \frac{PC * N}{(1+r)^t}$$

In cui T e r indicano rispettivamente gli anni e il discount rate. N è il numero di elevatori e PC è la quota di percentuale.

Il valore di N è calcolato con la seguente formula:

$$N = \frac{\text{Throughput/hour}}{(\text{number of cycles /hour}) * u} \quad (\text{Amato F., 2005})$$

Dove con u si indica il coefficiente di utilizzazione media dell'elevatore. N è arrotondato al numero intero più alto.

Da questa relazione possiamo valutare come il costo di manutenzione sia direttamente correlato con il valore del throughput e con il numero di elevatori: in particolar modo, aumenta all'aumentare del primo e diminuisce all'aumentare del secondo.

KPI Description	
Content:	
Name	Costo di manutenzione
ID	
Description	Il costo di manutenzione è calcolato come una percentuale dei costi di investimento in cui si incorre per gli elevatori.
Scope	Product cost
Formula	$C_m = \sum_{t=1}^T \frac{PC_1 * N}{(1+r)^t}$
Unit of measure	Euro
Range	
Trend	Più è basso, maggiore è l'efficienza
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, management

TABELLA 14 COSTO DI MANUTENZIONE

4.2.4 Costo di inventario

Il costo di inventario comprende diverse tipologie di costi: costi di acquisizione (per la negoziazione e per la preparazione dei requisiti, per il posizionamento degli item, per il mantenimento dei materiali, per la preparazione degli ordini); costi di mantenimento (relativi al costo della superficie utilizzata, alle assicurazioni, all'energia necessaria, costi del lavoro relativi al mantenimento del magazzino, costi di deterioramento e obsolescenza); altri costi (costi dovuti ad idle time, perdita della fiducia da parte del cliente, perdite produttive).

Il costo totale di inventario (IC) è calcolato come:

$$IC = AOC + AHC \text{ (Raptis, 2015)}$$

Le variabili utilizzate indicano il costo annuale di acquisizione (AOC) e il costo annuale di mantenimento (AHC). Nello specifico:

$$AOC = \frac{D}{Q} * OC$$

$$AHC = \frac{Q}{2} * HC$$

Dove D rappresenta la domanda, Q la quantità, OC e HC sono rispettivamente i costi di acquisizione e mantenimento per unità.

KPI Description	
Content:	
Name	Costo di inventario
ID	
Description	Il costo di inventario (IC) è dato dalla somma dei costi di mantenimento, costi di acquisizione e da altri eventuali costi.
Scope	Product cost, work unit
Formula	$IC = AOC + AHC$ (Raptis, 2015)
Unit of measure	Euro
Range	Varia in base alle necessità del magazzino
Trend	Minore è il costo, maggiore è l'efficienza
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, management

TABELLA 15 COSTO DI INVENTARIO

4.2.5 Inventory turnover

KPI Description	
Content:	
Name	Inventory turnover
ID	
Description	L'inventory turnover è calcolato come il rapporto tra il costo totale del bene venduto e il tempo medio in cui l'unità rimane stoccata nel magazzino.
Scope	Product cost, work unit
Formula	$IT = \frac{COGS}{average\ inventory}$
Unit of measure	Euro
Range	Più è basso, maggiore è l'efficienza
Trend	Più è basso, più il sistema è veloce nel ricambio degli item
Context:	
Timing	Periodicamente, Su richiesta
Audience	Supervisore, management, Operatore

TABELLA 16 INVENTORY TURNOVER

L'inventory turnover è calcolato come il rapporto tra il costo totale del bene venduto (COGS) e il tempo medio di stoccaggio dell'unità (\bar{I}).

La formula che permette di valutarlo è:

$$IT = \frac{COGS}{\bar{I}}$$

Un metodo alternativo per il calcolo del turnover si basa sulla seguente formula:

$$COI(i) = \frac{C_i}{f_i} \text{ (Bortolini M., 2017)}$$

In cui C_i indica la capacità del magazzino e f_i è la frequenza in uscita per il gruppo di unità i .

Minore è questo valore, maggiore sarà il tasso di turnover e di conseguenza maggiore sarà la vicinanza alla postazione di carico/scarico.

4.3 Indici ambientali

4.3.1 Coefficiente di utilizzo volumetrico

Il coefficiente di utilizzo volumetrico è utilizzato per valutare la percentuale di volume che può essere utilizzata per stoccare gli item nel magazzino e per la creazione del magazzino stesso. Il volume a disposizione può variare anche in base alla tipologia di prelievo che viene scelta: nel caso in cui si proceda con una metodologia LIFO (Last In First Out) l'unità può essere prelevata dallo stesso lato in cui essa viene immessa e si può inserire un numero ridotto di corridoi; nel caso di sistema FIFO (First In First Out), invece, è necessario ricorrere a due corridoi diversi. (Khojasteh, 2016) Inoltre, l'automazione ha permesso di aumentare lo spazio a disposizione di almeno il 50%.

Il volume Massimo che può essere utilizzato può essere valutato come:

$$V_{max} = \frac{\text{ore}}{\text{settimana}} * (\% \text{utilizzo stazioni}) * (n^{\circ} \text{stazioni totali}) * \text{pick rate} \text{ (Stowe, 2016)}$$

La percentuale di utilizzo delle stazioni è calcolata come il numero di ore di utilizzo su un totale di 24 ore giornaliere; poiché le stazioni richiedono una quota di tempo per poter effettuare la manutenzione e i cambi, questa quota non sarà mai pari al 100% dell'utilizzazione.

KPI Description	
Content:	
Name	Coefficiente utilizzo volumetrico
ID	
Description	Il coefficiente di utilizzo volumetrico (CV) è dato dal rapporto tra il numero di m^3 utilizzati e il volume massimo disponibile.
Scope	Work center
Formula	$CV = \frac{m^3 \text{ utilizzati}}{V_{max}}$
Unit of measure	Percentuale
Range	1-100%
Trend	Più è alto, maggiore è lo spazio sfruttato per il magazzino
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Management

TABELLA 17 COEFFICIENTE DI UTILIZZO VOLUMETRICO

4.3.2 Coefficiente di utilizzo superficiale

Il coefficiente di utilizzazione superficiale rappresenta la percentuale di superficie utilizzata per la creazione del magazzino in rapporto a quella che viene invece lasciata libera per il passaggio degli operatori e degli AGV per il prelievo e la gestione degli item.

KPI Description	
Content:	
Name	Coefficiente utilizzo superficiale
ID	
Description	Il coefficiente di utilizzazione superficiale rappresenta la percentuale di superficie utilizzata per la creazione del magazzino in rapporto a quella che viene invece lasciata libera per il passaggio degli operatori e degli AGV per il prelievo e la gestione degli item.
Scope	Work center
Formula	Coefficiente di utilizzazione superficiale = $\frac{m^2 \text{utilizzati}}{m^2 \text{totali}}$
Unit of measure	Percentuale
Range	0%-100%
Trend	Più alto è, meglio è
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, management

TABELLA 18 COEFFICIENTE DI UTILIZZO VOLUMETRICO

Così come per il coefficiente volumetrico, anche in questo caso la percentuale utilizzata risulterà dipendente dalla scelta di usare delle logiche LIFO o FIFO. (Khojasteh, 2016)

Effettuata questa scelta strategica, il coefficiente di utilizzazione superficiale può essere calcolato come segue:

$$CS = \frac{m^2 \text{utilizzati}}{m^2 \text{totali}}$$

Inoltre, Stowe [36] ha studiato un modo per calcolare il numero di scaffali da inserire nel magazzino in modo che si ottimizzasse il lavoro dei robot adibiti alla movimentazione dei pallet:

$$n = \frac{L}{b*m}$$

dove con L si indica il numero di pallet, m indica la durata media di una missione per ogni robot, b*m è il numero di unità prelevate durante la missione. Il motivo per cui considera di calcolare il numero di scaffalature attraverso questa formula è dovuto al fatto che in questo modo si riesce anche ad ottimizzare il lavoro che viene svolto dai robot.

4.3.3 Spazio libero

KPI Description	
Content:	
Name	Spazio libero
ID	
Description	L'indice di spazio libero è calcolato come la differenza tra lo spazio totale che si ha a disposizione nel magazzino e lo spazio occupato dagli item.
Scope	Work center
Formula	$FS = m^2utilizzati - C_{area}$
Unit of measure	m^2
Range	
Trend	Più basso è, maggiore è l'efficienza
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, management

TABELLA 19 SPAZIO LIBERO

Questo indice valuta quale sia lo spazio non occupato dagli item rispetto allo spazio totale che si ha a disposizione nel magazzino. Leng et al. hanno analizzato che per un corretto utilizzo degli spazi all'interno del magazzino è importante che si ottimizzi il packaging con cui vengono stoccate le unità. Questo permette anche di migliorare la stabilità durante il trasporto, riduce il collo di bottiglia e prevede ingorghi logistici.

L'area totale occupata dall'unità è calcolata come:

$$C_{area} = 2 \sum_{i=1}^I L_i H_i + 2 \sum_{i=1}^I L_i W_i + 2 \sum_{i=1}^I W_i H_i \quad (\text{Bortolini M., 2017})$$

Dove L_i , H_i e W_i sono rispettivamente la lunghezza, l'altezza e lo spessore dell'unità i.

4.3.4 Temperatura

L'indice di temperatura (SF) calcola il numero di giorni in cui la temperatura risulta sopra il suo livello medio (30°C) o sotto i 0°C e considera anche i giorni di pioggia del mese considerato.

La formula individuata è:

$$SF_{ij} = \sum_{r=1}^R (NB_r \cdot x(H_{jr} + R_{jr}))$$

Dove: NB_r è il numero di unità vendute nell'area r , H_{jr} è il numero di giorni in cui la temperatura è sopra i 30°C o sotto i 0°C nel mese j e nell'area r ; R_{jr} è il numero di giorni di pioggia nel mese j nell'area r .

KPI Description	
Content:	
Name	Temperatura
ID	
Description	Questo indice calcola il numero di giorni in cui la temperatura risulta sopra il suo livello medio (30°C) o sotto i 0°C e considera anche i giorni di pioggia del mese considerato.
Scope	Work center
Formula	$SF_{ij} = \sum_{r=1}^R (NB_r \cdot x(H_{jr} + R_{jr}))$
Unit of measure	Giorni
Range	1-31 giorni
Trend	È importante che la temperatura rimanga il maggior numero di giorni possibili attorno al suo lavoro medio
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, management

TABELLA 20 TEMPERATURA

4.4 Indici di qualità

4.4.1 Throughput

Il throughput consiste nel numero di pallet che vengono processati nell'unità di tempo. Nei magazzini automatici l'utilizzo degli AGV ha permesso di ottenere un'alta scalabilità all'interno delle imprese che

li hanno inseriti anche grazie al fatto che il numero di veicoli utilizzati, il numero di ripiani e quello delle picking stations può essere modificato facilmente per adattarlo al meglio alla situazione. Variando il numero di questi tre fattori è possibile lavorare sul throughput finale del sistema.

$$\text{Throughput} = \frac{I}{\sum_{x=1}^X (P_i^{(x)} + W_x)}$$

Dove con I si intende il numero totale di item da prelevare; X è il numero totale di picking stations; $P_i^{(x)}$ è il tempo totale richiesto per prelevare e smistare nella picking station numero x; W_k è il tempo totale di attesa nella picking station k. (Yoshitake, 2019)

KPI Description	
Content:	
Name	Throughput
ID	
Description	Il throughput consiste nel numero di pallet che vengono processati nell'unità di tempo. È calcolato come il rapporto tra il numero totale di item da prelevare (I) e la somma del tempo totale richiesto per prelevare e smistare nella picking station numero k (P_x) e il tempo totale di attesa nella picking station k (W_x) calcolati per tutte le stazioni.
Scope	
Formula	$\text{Throughput} = \frac{I}{\sum_{x=1}^X (P_x + W_x)}$
Unit of measure	units/time
Range	
Trend	Più alto è, meglio è
Context:	
Timing	Su richiesta, in tempo reale
Audience	Supervisore, management, operatore
Production methodology	
Effect model diagram	
Notes	Influenzato dal numero di AGV

TABELLA 21 THROUGHPUT

Un altro metodo per calcolare il throughput è stato studiato da Stowe [36] il quale ha valutato che lo si potesse calcolare come il prodotto di tre fattori: numero di unità presenti nel magazzino in quel dato momento, numero di ore lavorate nella settimana e il tasso di prelievo delle unità ($\frac{\text{units}}{\text{time}}$).

$$\text{Throughput} = n^{\circ}\text{unità} * \frac{h}{w} * \text{rate (Stowe, 2016)}$$

In particolar modo, il picking rate può essere calcolato come:

$$\text{Pick rate} = \frac{3600 * \text{Utilizzazione operatore}}{CT}$$

dove con cycle time (CT) si intende il tempo necessario per l'estrazione di un'unità; questo indice sarà analizzato più nello specifico.

Infine, il throughput è anche influenzato dal numero di AGV utilizzati e dal numero di unità che possono essere stoccate nel magazzino; entrambi questi indici saranno analizzati in questo lavoro di tesi.

4.4.2 Collo di bottiglia

KPI Description	
Content:	
Name	Bottleneck rate
ID	
Description	Il Bottleneck rate, o collo di bottiglia, è calcolato come il tempo di completamento necessario affinché sia completata l'operazione che prevede il percorso più lungo.
Scope	
Formula	$J_3 = \frac{1}{X} \max_{i \in [1, N]} D_p$
Unit of measure	Minuti
Range	
Trend	Minore è, maggiore è l'efficienza
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, management

TABELLA 22 BOTTLENECK RATE

Il collo di bottiglia può essere calcolato come il tempo di completamento necessario affinché sia completata l'operazione che prevede il percorso più lungo. È importante tenere in considerazione l'influenza che può avere il numero di robot presenti all'interno del magazzino e la velocità con cui questi lavorano. Infatti, un numero ridotto di robot rispetto alle quantità da trasportare potrebbe causare dei rallentamenti nella gestione del magazzino.

Lo stesso ragionamento può essere applicato sulla velocità con cui gli AGV si muovono: una velocità più bassa richiede dei tempi di svolgimento maggiori.

La formula utilizzata è:

$$J_3 = \frac{1}{K} \max_{i \in [1, N]} D_p \quad (\text{Kam Fai Elvis Tsang, 2018})$$

Dove K è il numero totale di tasks; D_i è la distanza che ogni robot percorre nello svolgimento della propria operazione.

Con la data formula si considera come collo di bottiglia la distanza massima percorsa da un AGV per lo svolgimento del task di cui è incaricato. (Kam Fai Elvis Tsang, 2018)

4.4.3 Errore medio

KPI Description	
Content:	
Name	Mean time between failure
ID	
Description	L'errore medio è calcolato come la somma dei tempi medi che intercorrono tra un errore e quello che si verifica successivamente ad esso.
Scope	Work unit
Formula	$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^{FE} TBF_i}{FE+1} \quad (\text{Jiewu Leng, 2019})$
Unit of measure	Minuti
Range	
Trend	Minore è, maggiore è l'efficienza
Context:	
Timing	Periodicamente
Audience	Supervisore, management, operatore

TABELLA 23 MEAN TIME BETWEEN FAILURE

L'errore medio è calcolato come il tempo medio che intercorre tra un errore e quello che si verifica successivamente ad esso per ogni work unit.

Lo si calcola attraverso la formula:

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^{FE} TBF_i}{FE+1} \quad (\text{Jiewu Leng, 2019})$$

In cui TBF_i è il tempo medio tra un errore e l'altro, i sono le work unit e FE indica l'istanza di errore.

4.4.4 Stock rotation

L'indice di stock rotation indica il numero medio di volte in cui le unità stoccate sono ripristinate; ovvero il tempo medio necessario per effettuare una rotazione delle unità. È dato dal rapporto tra il throughput e la quantità media di unità stoccate in magazzino; è generalmente utilizzato per valutarne l'efficienza.

Lo si calcola come:

$$SR = \frac{TH}{I} \text{ (Jiewu Leng, 2019)}$$

Il tempo di stoccaggio degli item influisce negativamente sulla qualità e sui costi di mantenimento del magazzino.

KPI Description	
Content:	
Name	Stock rotation
ID	
Description	Questo indice calcola il tempo medio necessario affinché le unità stoccate siano completamente vendute o estratte dal magazzino.
Scope	Product cost, work unit
Formula	$SR = \frac{TH}{I}$
Unit of measure	time
Range	Il tempo minimo è 0, il massimo dipende dal tipo di bene stoccato
Trend	Più è basso, più il sistema è veloce nel ricambio degli item
Context:	
Timing	Periodicamente, Su richiesta
Audience	Supervisore, management, Operatore

TABELLA 24 STOCK ROTATION

4.4.5 Utilizzo scaffali

L'indice di utilizzo degli scaffali è calcolato come il valore massimo del rapporto tra la somma di tutte le unità che devono essere stoccate rispetto alla somma del volume totale disponibile negli spazi di stoccaggio.

La suddivisione in scaffali è un elemento di forte vantaggio per il magazzino perché permette di accrescere il throughput e ridurre i costi operativi. Per questi motivi uno degli obiettivi principali nella

creazione del magazzino è quello di massimizzare e ottimizzare l'utilizzo degli spazi e la distribuzione degli item.

L'indice è calcolato come:

$$J_s = \max \frac{\sum_{i=1}^N V_{LL,i}}{\sum_{i=1}^N V_{SC,i}} \text{ (Onanaye, 2019)}$$

Dove $V_{LL,i}$ è il volume dell'unità i stoccata e $V_{SC,i}$ è il volume dell'area in cui l'unità deve essere stoccata.

Perché questo indice sia valido devono poi verificarsi tre condizioni:

$$L_{LL,i} \leq L_{SC,i}, \quad i=1,2..N$$

$$W_{LL,i} \leq W_{SC,i}, \quad i=1,2..N$$

$$H_{LL,i} \leq H_{SC,i}, \quad i=1,2..N$$

Con $L_{LL,i}$, $W_{LL,i}$, $H_{LL,i}$, $L_{SC,i}$, $W_{SC,i}$, $H_{SC,i}$ che indicano rispettivamente la lunghezza, profondità e altezza dell'item e dell'area. (Onanaye, 2019)

KPI Description	
Content:	
Name	Utilizzo scaffali
ID	
Description	L'indice di utilizzo degli scaffali è calcolato come il valore massimo del rapporto tra la somma di tutte le unità che devono essere stoccate rispetto alla somma del volume totale disponibile negli spazi di stoccaggio.
Scope	Work center
Formula	$J_s = \max \frac{\sum_{i=1}^N V_{LL,i}}{\sum_{i=1}^N V_{SC,i}} \text{ (Onanaye, 2019)}$
Unit of measure	Percentuale
Range	0-100%
Trend	Più è alto, maggiore è lo spazio sfruttato
Context:	
Timing	periodicamente
Audience	Supervisore, management

TABELLA 25 UTILIZZO SCAFFALI

4.4.6 Utilizzo medio risorse

L'indice di utilizzo medio delle risorse indica la percentuale di utilizzo delle risorse umane nella gestione del magazzino rapportato alla disponibilità totale di risorse presenti.

Nei magazzini automatici l'occupazione delle risorse è molto più bassa che nei magazzini classici in quanto il personale è spesso sostituito dall'azione dei robot e le loro mansioni sono state ridotte a dei livelli minimi con l'obiettivo di ottimizzare la catena logistica, di migliorare l'efficienza e di incrementare la flessibilità e il controllo del sistema. Il personale umano presente in questa tipologia di magazzini ha, dunque, il compito di controllare e impostare gli algoritmi di gestione dei sistemi automatici, di intervenire laddove ci siano dei problemi di funzionamento e di svolgere mansioni in cui gli AGV non possono essere utilizzati. (Colling, 2019)

L'utilizzo medio delle risorse è calcolato come:

$$U_m = \frac{H_u}{Availability}$$

Dove H_u rappresenta le ore di utilizzo delle risorse umane e availability rappresenta la disponibilità totale in ore.

KPI Description	
Content:	
Name	Utilizzo medio risorse
ID	
Description	L'utilizzo medio delle risorse calcola il rapporto tra le ore in cui si ricorre al lavoro degli operatori e le ore totali in cui essi sono disponibili.
Scope	Personnel
Formula	$U_m = \frac{H_u}{Availability}$
Unit of measure	Percentuale
Range	0-100%
Trend	Maggiore è, maggiore è l'efficienza
Context:	
Timing	Periodicamente
Audience	Management, operatore

TABELLA 26 UTILIZZO MEDIO RISORSE

4.4.7 Selettività

L'indice di selettività calcola quale sia il numero di celle accessibili rispetto al numero totale di celle presenti nel magazzino.

Per la valutazione di questo indice si deve considerare il numero di corridoio presenti nel magazzino in quanto, come visto in precedenza, ci sono dei magazzini in cui gli scaffali sono movibili e possono essere spostati a seconda della necessità di prelievo che si presenta nel magazzino. Il numero di celle

direttamente accessibili è sicuramente maggiore nei magazzini che hanno un corridoio a scaffalatura, con il contro di avere un coefficiente di utilizzo volumetrico spesso inferiore; è invece minore nei magazzini che riducono il numero di corridoio per ottimizzare lo sfruttamento degli spazi.

Inoltre, spesso ogni scaffalatura contiene più celle nello stesso ripiano, non tutte direttamente accessibili. Sono quei magazzini in cui per il prelievo si ricorre a delle logiche di stoccaggio LIFO o FIFO, ovvero dove più unità sono stoccate nello stesso slot dello stesso ripiano e le si estrae secondo una delle logiche citate.

Per le considerazioni fatte, l'indice di selettività può essere calcolato come:

$$S = \frac{c_{da}}{C_{tot}}$$

Dove C_{tot} è il numero di celle presenti nel magazzino, c_{da} è il numero di celle direttamente accessibili dal robot per il prelievo dell'unità.

KPI Description	
Content:	
Name	Selettività
ID	
Description	La selettività è calcolata come il numero di celle accessibili sul totale di celle presenti nel magazzino.
Scope	Production plant, work center
Formula	$S_e = \frac{c_{da}}{C_{tot}}$
Unit of measure	Percentuale
Range	0-100%
Trend	Maggiore è, maggiore è la quantità di celle accessibili
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, management

TABELLA 27 SELETTIVITÀ

4.4.8 Ricettività

La ricettività (o capacità del magazzino) è data dalla quantità di unità stoccate in una unità di tempo.

$$Q_{In} = \frac{\mu * N_{In} * p}{D_w * J_4 * b} \text{ (Bortolini M., 2017)}$$

N_{In} indica il numero di unità ricevute in un dato intervallo di tempo; p indica il numero di casi elaborati; μ è il coefficiente globale sbilanciato del sistema. D_w è il tempo totale di ispezione per l'azione; d_n è il tempo di lavoro effettivo per il singolo sistema e b indica il peso dell'unità.

Questo indice è influenzato principalmente da due fattori: la dimensione dei pallet/unità che vengono stoccati nel magazzino e il volume effettivamente utilizzabile calcolato in base al volume totale a disposizione da cui viene sottratta la parte occupata dalla struttura che compone il magazzino. Inoltre, all'interno dello stesso magazzino, può crearsi la necessità di stoccare unità che hanno dimensioni tra loro differenti.

Più sarà ridotto il numero di unità in uno scaffale, più sarà alto il numero di scaffali necessari per poter stoccare tutti gli item da inserire nel magazzino.

È importante tenere anche in considerazione il Total Stored Weight (Nastasi, 2016), ovvero l'indice di peso totale degli item stoccati, il quale dipende dalle dimensioni e dal numero di pezzi stoccati. Si esprime con la formula:

$$TSW = \sum_{k=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_k} w_{kj}$$

dove N_c è il numero di comparti presenti, N_k è il numero di item nel comparto k e w_{kj} è il peso del j -esimo pezzo.

Tenendo presenti queste considerazioni, in questo lavoro, una formula che possa fornire supporto nella scelta del numero di posizioni necessarie nel magazzino automatico.

$$SC = \frac{V}{\sum_{j=1}^J v_j + \sum_{i=1}^I v_i}$$

dove SC è l'indice di Storage Capacity, V è il volume massimo utilizzabile nel magazzino, v_j e v_i sono rispettivamente i volumi utilizzati delle unità di tipo j e da quelle di tipo i . In questa formula sono considerate, per semplicità, solo due tipologie di item stoccati, ma la si può implementare al fine di utilizzarla con una varietà più ampia.

Si considera anche che ogni magazzino ha differenti tipologie di scaffali a seconda degli item che dovrà stoccare; il numero totale delle stazioni a disposizione è calcolato come il prodotto delle righe del magazzino per il numero delle colonne e dei piani realizzati. (Wanlei Wang, 2017)

In conclusione, il TSW deve essere massimizzato affinché il magazzino abbia delle performance di capienza migliori e l' SC deve essere valutato tenendo in considerazione che la somma dei pesi di tutte le unità stoccate sia inferiore del TSW . (Nastasi, 2016)

KPI Description	
Content:	
Name	Ricettività
ID	
Description	La ricettività indica la quantità di unità di carico che possono essere stoccate nell'unità di tempo.
Scope	Work unit, product
Formula	$Q_{In} = \frac{\mu * N_{In} * p}{D_w * J_4 * b}$ (Bortolini M., 2017)
Unit of measure	unità/ora
Range	0-numero max di unità stoccabili
Trend	Maggiore è il Q_{In} , maggiore è la quantità di unità movimentata all'ora
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, management, operatore

TABELLA 28 RICETTIVITÀ

4.4.9 Consumo di energia

Il consumo di energia viene calcolato come:

$$e_{bstr}^p = 2 * (m_p + 2m^{SH} + 2m^{SC}) * e_{bs}^x + (m_p + 2m^{SH}) * (e_l^{z\uparrow} + e_l^{z\downarrow}) + 2m_p * e_r^{belt}$$

Dove: e_{bs}^x è l'energia necessaria per la movimentazione di una unità per una distanza X_{bs} , $e_l^{z\uparrow}$ e $e_l^{z\downarrow}$ sono le energie richieste per le traiettorie in fase ascendente e discendente e sono entrambe calcolate al netto di un fattore che permette di calcolare la quota parte di energia cinetica dissipata dai freni. Le m rappresentano: m_p è la massa del prodotto; m^{SH} è la massa del veicolo; m^{SC} è la massa della colonna posta a supporto del veicolo. Infine, e_r^{belt} , è l'energia consumata tra il carico/scarico del veicolo e il punto di consegna dello scaffale. (Liu, 2018)

I magazzini automatizzati permettono di ridurre la quantità di energia utilizzata per la ventilazione, la gestione della temperatura e l'illuminazione della zona di stoccaggio in quanto hanno una metratura che dimensioni ridotte rispetto ai magazzini classici; tuttavia, è importante prestare attenzione alla quantità di energia richiesta per le operazioni automatizzate di stoccaggio e prelievo. I produttori di magazzini automatici stanno lavorando su delle tecnologie che permettano di recuperare l'energia dissipata durante l'attività del magazzino e riutilizzarla come supporto energetico al sistema.

In particolar modo, si potrebbe sfruttare l'energia gravitazionale che si ricava operando nelle postazioni in alto nelle scaffalature e questo potrebbe accrescere la volontà dei costruttori di creare dei magazzini con estensione verticale. Il recupero dell'energia si aggira attorno al 26% e avviene quando il momento torcente risulta negativo.

KPI Description	
Content:	
Name	Consumo di energia
ID	
Description	Il consumo di energia è calcolato come la somma richiesta per ogni unità di throughput, posizione di stoccaggio e per ogni singolo ciclo di movimentazione degli item.
Scope	
Formula	$e_{bstr}^p = 2 * (m_p + 2m^{SH} + 2m^{SC}) * e_{bs}^x +$ $+(m_p + 2m^{SH}) * (e_l^{z\uparrow} + e_l^{z\downarrow}) + 2m_p * e_r^{belt}$ <p style="text-align: center;">(Liu, 2018)</p>
Unit of measure	Energia /unità di massa
Range	
Trend	Più basso è, maggiore è l'efficienza
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, management

TABELLA 29 CONSUMO DI ENERGIA

Tuttavia, è stato studiato che per ottimizzare le performance del magazzino serve effettuare un trade-off tra la quantità di energia recuperata e il tempo di prelievo necessario per eseguire l'operazione: infatti non sempre risulta vantaggioso stoccare gli item nelle posizioni più alte in quanto questa soluzione porta a dei tempi di prelievo spesso elevati, o comunque maggiori rispetto a quelli necessari per il prelievo da una posizione più facilmente accessibile. (Meneghetti A., 2013)

Meneghetti et al. hanno studiato che il risparmio di energia dipende dunque anche dalle dimensioni degli scaffali: nel caso di dimensioni 22x45 e una distribuzione della domanda di 20-50 il risparmio si aggira attorno al 22%; nel caso di una curva di distribuzione di 80-20 il risparmio, invece, è di circa il 26%. Con distribuzione 20-50 e 80-20 si intende che è stata studiata la distribuzione per un corridoio in cui sono stoccati 100 items e la distribuzione considerata è 20-50 o 80-20. (Meneghetti A., 2013)

4.4.10 Picco di utilizzo

KPI Description	
Content:	
Name	Picco di utilizzo
ID	
Description	Il picco di utilizzo (PU) rappresenta la percentuale massima di utilizzo di magazzino. È calcolato come il prodotto tra il picco di throughput e la latenza operativa.
Scope	Work station, work center
Formula	$PU = PTH * OLB$ [52]
Unit of measure	N° di unità
Range	0-Numero massimo di unità stoccabili
Trend	Maggiore è, maggiore è lo sfruttamento del magazzino
Context:	
Timing	Periodicamente
Audience	Supervisore, operatore

TABELLA 30 PICCO DI UTILIZZO

Il picco di utilizzo (PU) rappresenta la percentuale massima di utilizzo di magazzino. È calcolato come il prodotto tra il picco di throughput e la latenza operativa.

$$PU = PTH * OLB \text{ (G. Liu, 2006)}$$

Dove PTH rappresenta il picco di throughput, OLB la latenza operativa.

Valutare il PU è importante soprattutto nei magazzini con un'alta stagionalità in quanto il throughput subisce delle modifiche durante l'arco dell'anno e, di conseguenza, anche l'utilizzo dei traslo elevatori e degli AGV. Un esempio sono i magazzini di aziende che producono e/o vendono prodotti surgelati (es. gelati), i quali nella stagione estiva si trovano ad affrontare una domanda, e quindi un throughput, maggiore. (A. Kattepur, 2018)

4.5 Efficienza AGV

4.5.1 Numero veicoli

Il numero di AGV che si decide di utilizzare per la gestione del magazzino ha una forte influenza sulla capacità di soddisfare il cliente al meglio e in tempi brevi. Allo stesso tempo, però, questi strumenti hanno dei costi molto elevati e la loro scelta deve pertanto essere ben calibrata facendo un trade-off tra la riduzione dei tempi di evasione degli ordini e la riduzione dei costi generali. Inoltre, degli elementi che spesso sono sottovalutati sono il tempo, il costo di ricarica degli AGV e il consumo di energia richiesto, il quale ha effetti sia sui costi che sull'ambiente per le emissioni di carbone che questi provocano. (Liu Y, 2019) Liul et al. hanno creato un algoritmo chiamato MAGA che permette di ottenere il numero ottimizzato di veicoli automatici utilizzati riducendo il makespan e la quantità di energia consumata.

Basile et al. (Basile, 2017), invece, hanno studiato un modello che considera come variabili: la lunghezza del circuito, il numero delle zone del magazzino e la loro lunghezza, il numero dei buffer di carico/scarico e il numero di posizioni di stoccaggio, la velocità e l'accelerazione con cui si muove il veicolo e il numero di volte che si ferma. Sono ricorsi a tre diversi dataset: il primo considera che, quando c'è una consegna da effettuare, questa può essere assegnata a più veicoli; il secondo prevede che molte consegne vengano inserite nel sistema con tempi molto ridotti, quindi il tempo di arrivo tra una consegna e l'altra è ridotto rispetto al tempo di completamento; il terzo caso prevede una situazione equilibrata tra le due precedenti.

I tre data set sono analizzati con tre diversi algoritmi:

- Mission management: imposta la consegna nella coda con ordine FIFO e seleziona la consegna successiva seguendo l'ordine. Procedo poi con l'algoritmo che segue;
- Auction stage: attribuisce la consegna a uno dei veicoli, il quale calcola la sua utilità basandosi sul terzo algoritmo che restituisce il minimo tra tutti i valori ricevuti, e viene considerato vincitore;
- Utility computation: se il veicolo non è impegnato ne calcola l'utilità, altrimenti restituisce valore "inf".

Sono stati valutati diversi numeri di veicoli: 16,18,20, 22. Questo modello ha come obiettivo quello di ottimizzare l'assegnazione delle consegne ai veicoli e permette di valutare quale sia il numero ottimale di AGV da utilizzare a seconda della situazione che si crea nel magazzino.

Stowe, ha ipotizzato che il numero di AGV attribuito ad ogni stazione potesse essere calcolato come:

$$N^{\circ} \text{ AGV} = \frac{W_x}{E[\text{mission times}]} \text{ (Stowe, 2016)}$$

in cui il W_x è dato dal tempo di attesa nella picking station, $E[\text{mission times}]$ indica il tempo medio necessario al raccoglitore per lo svolgimento dell'operazione. Tuttavia, è importante considerare che il numero di robot necessari varia anche in base alla variazione della velocità di lavoro dello stesso raccoglitore in periodi con affluenza di prelievi differenti. Se si lavora in modo più sostenuto perché la quantità degli item da movimentare è maggiore, sarà necessario avere a disposizione un numero più elevato di AGV; viceversa, un numero ridotto. Per questo motivo, nella valutazione del numero di veicoli inseriti, sarà importante effettuare anche questa considerazione.

Per concludere, un numero di AGV più alto permette al magazzino di ottenere un throughput maggiore. (Stowe, 2016)

KPI Description	
Content:	
Name	Numero AGV
ID	
Description	Il travel time è dato dal rapporto del picker cycle time, dato dalla media del tempo di attesa nei punti di riferimento) e del $E[\text{mission times}]$ che indica il tempo medio necessario al raccoglitore per lo svolgimento dell'operazione.
Scope	
Formula	$AGV = \frac{W_x}{E[\text{mission times}]}$
Unit of measure	Min, h
Range	
Trend	Dipende da altre variabili
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, management

TABELLA 31 NUMERO AGV

4.5.2 Efficacia nel riconoscere gli item

Il metodo più efficace per rilevare gli item negli scaffali è quello che prevede l'utilizzo di tag identificativi della posizione dell'unità da prelevare. Le informazioni possono essere lette con l'utilizzo di scanner laser, con barcode 2D o 3D e con sistemi di radiofrequenza. (A. Causo, 2017), (Amato F., 2005) Tutte queste tecnologie hanno però il limite di non permettere di identificare in modo diretto ed efficace l'item. Per questo motivo si può ricorrere al sistema RFID (Radio Frequency Identification), il

quale permette di avere un'alta versatilità e può essere utilizzato in molte situazioni con contesti differenti. (Amato F., 2005)

Causo et al. hanno lavorato ad un sistema chiamato VITag, con l'obiettivo di creare un market che potesse contenere il maggior numero di informazioni possibili, con il limite che queste possano essere identificate solo ad una distanza non troppo elevata. Il sistema è anche solido in presenza di disturbi e pieghe. Una volta che il sistema riceve le informazioni necessarie per effettuare il prelievo, l'AGV è in grado di navigare verso la zona in cui deve eseguire l'operazione e di posizionarsi al meglio.

Per migliorare l'efficacia di questo sistema si definisce una zona detta "sweet box", ovvero una zona in cui opera il robot dove è più probabile che non incontri problemi o ostacoli durante lo svolgimento delle proprie operazioni. Generalmente questa zona ha delle dimensioni comprese tra 0,7-1,1 m nell'asse x, 0,3-0,7 m nell'asse y e +/-0,3 m nell'asse z. (A. Causo, 2017)

KPI Description	
Content:	
Name	Efficacia nel riconoscimento degli elementi
ID	
Description	Esprime la capacità di un sistema di saper riconoscere gli item da prelevare dalle scaffalature.
Scope	Work unit, work centre, product
Formula	$ER = \frac{n^{\circ} \text{ item riconosciuti}}{n^{\circ} \text{ item totali}}$
Unit of measure	Percentuale
Range	0%-100%
Trend	Maggiore è l'efficacia, maggiore è il numero di item elaborati nell'unità di tempo.
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, management

TABELLA 32 EFFICACIA NEL RICONOSCIMENTO DEGLI ITEM

Jotawar et al. [40] (Sharath Jotawar, 2017), invece, hanno analizzato un altro sistema, detto JSON, per individuare la posizione della postazione in cui deve essere posizionato il pallet. Una volta che la postazione è stata identificata il robot lo ripone nello scaffale facendo attenzione a non rovinarlo. Una volta eseguita l'operazione l'AGV crea un output JSON indicando la posizione finale dell'item nello scaffale. Lo stesso sistema può essere utilizzato anche per il prelievo delle unità. È composto da quattro

parti: lo spazio cartesiano individuato come area in cui si può riporre la parte; un sistema che tramite algoritmi cinematici controlla i movimenti angolari e la velocità del robot; un controller che converte le traiettorie così da risultare comprensibili per il robot e un sistema che analizza le possibili collisioni che potrebbero avvenire nel percorso e crea un path che permette al robot di evitarle. (Sharath Jotawar, 2017)

La formula che permette di stimare questo indice è:

$$ER = \frac{\text{n° item riconosciuti}}{\text{n° item totali}}$$

4.5.3 Autonomia batteria veicolo

KPI Description	
Content:	
Name	Autonomia batteria
ID	
Description	L'autonomia della batteria (BCT) identifica la durata della batteria dal momento in cui essa è al livello massimo di carica fino a quando è necessaria una carica successiva.
Scope	Work centre
Formula	$BCT = \frac{b_u}{cr} + \frac{b_u}{dr}$ (Yoshitake, 2019)
Unit of measure	time
Range	0-massima autonomia
Trend	Più alto è, meglio è
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, worker

TABELLA 33 AUTONOMIA DELLA BATTERIA

Il calcolo dell'autonomia della batteria è utile per capire quale sia il momento migliore in cui un AGV deve essere ricaricato col fine di ottimizzare la disponibilità dei robot nella gestione del magazzino, soprattutto nei momenti di picco di throughput (Fig. 7).

È ottenuto grazie alla seguente formula:

$$BCT = \frac{b_u}{cr} + \frac{b_u}{dr} \text{ (Sunderesh S. Heragu, 2011)}$$

Dove b_u denota la capacità percentuale di batteria utilizzabile rispetto alla capacità totale, calcolato come la differenza tra il livello massimo di carica e quello minimo raggiunto il quale è conveniente provvedere alla carica (safe level); cr è il charging rate e dr è la discharging rate, ovvero il tasso di scarico della batteria.

Yoshitake et al. (Yoshitake, 2019) hanno effettuato una simulazione in cui è emerso che il tempo di durata totale di una batteria è di circa un'ora; mentre il tempo di ricarica si aggira attorno a qualche minuto. La loro ipotesi è stata quella di ricaricare il veicolo quando questo si trova al 50% della batteria.

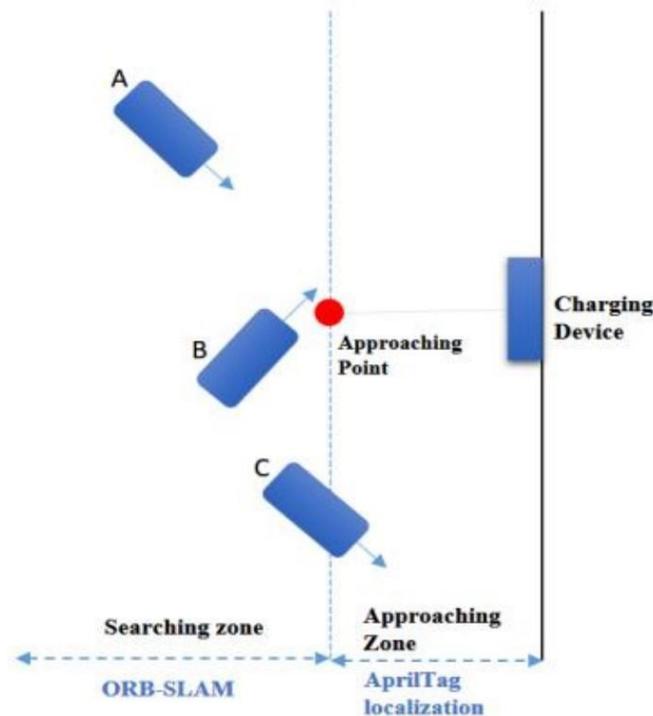


FIGURA 9 APPROCCIO DEI ROBOT A,B,C ALLA STAZIONE DI RICARICA IN BASE ALLA LORO POSIZIONE DI PARTENZA

4.5.4 Numero collisioni

Fondamentale per la valutazione delle performance degli AVS/RS è il calcolo degli scontri che avvengono tra i robot durante il percorso di carico/scarico poiché risultano svantaggiosi per l'organizzazione del magazzino causando ritardi e problematiche nelle procedure di gestione.

Per questo motivo diversi studi si sono concentrati sull'analisi di questa problematica. Luna and Bekris hanno elaborato una tecnica che si basa sull'utilizzo di due robot in parallelo: l'azione "push" permette che i due robot si muovano seguendo il percorso predisposto; l'azione "swap" permette di bloccarli nel

caso in cui stiano per collidere e di intervenire correggendo le rotte o rallentando quello con meno priorità. (Bekris, 2011)

Un altro algoritmo prevede invece che i robot si muovano in base al percorso per loro pianificato e che vengano bloccati, con successiva ripianificazione del percorso, solo nel caso in cui si crei il pericolo di collisione tra due o più dispositivi. L'obiettivo principale (che si tiene in considerazione) è quello della minimizzazione del percorso che ogni robot deve effettuare e, nel caso in cui si vada incontro a dei percorsi condivisi, si valuta come modificarli e quali siano i robot che hanno necessità di precedenza rispetto agli altri. Inoltre, nel caso in cui gli AGV non partano contemporaneamente, nella creazione del tragitto (di quelli che partono per secondi), si considera la presenza degli altri dispositivi programmati in precedenza. (M. Kulich, 2019)

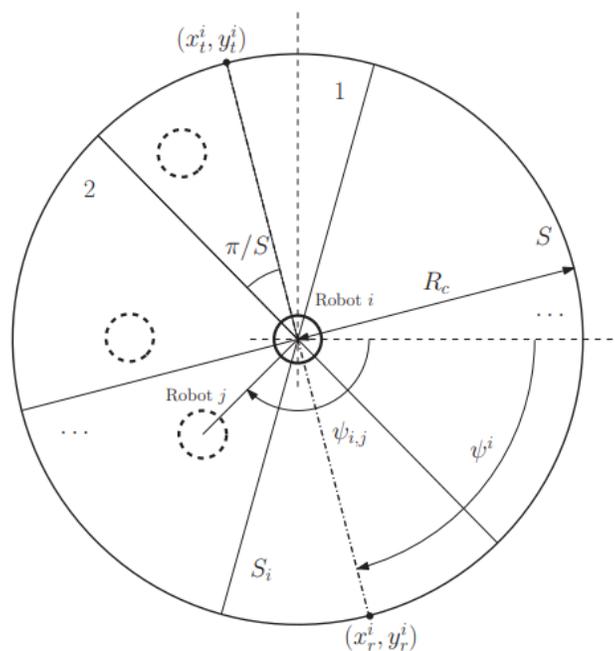


FIGURA 10 SETTORE CIRCOLARE IN CUI SI PUÒ VERIFICARE UNA COLLISIONE CON RAGGIO R_c

Poltena ed Emde hanno dimostrato come la larghezza dei corridoi abbia una bassa influenza sulla riduzione delle intersezioni dei percorsi dei veicoli, in quanto il vantaggio ricavato viene negativamente compensato dalla loro lunghezza, perciò magazzini con corsie strette sono spesso in grado di raggiungere la stessa produttività che sarebbe ricavata nel caso di corsie più larghe. Inoltre, nel caso di un alto numero di AGV può risultare utile per accrescere l'efficienza la scelta di accessi paralleli nei corridoi del magazzino. La scelta tra ricorrere a ingressi parallelizzati nei corridoi o, come visto poche righe sopra, seguire delle regole di priorità può essere valutata in base al rapporto tra il numero di AGV e quello dei corridoi presenti. (Lukas Polten, 2021)

KPI Description	
Content:	
Name	Numero collisioni
ID	
Description	Il numero di collisioni totali all'interno del magazzino è dato dal prodotto del numero di collisioni che si verifica per ogni robot NC_f moltiplicato per il numero totale di robot presenti nel magazzino.
Scope	Work center
Formula	$NC = NC_f * AGV$
Unit of measure	N° collisioni/tempo
Range	
Trend	Dipende da altre variabili
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, management

TABELLA 34 NUMERO COLLISIONI

Infine, Guney et al. (Jiewu Leng, 2019), hanno sviluppato un algoritmo che valuta la condizione tale per cui, se verificata, due AGV entrano in collisione.

Il dato algoritmo afferma che una collisione si verifica quando:

$$\rho_{i,j} \leq R_c$$

Dove $\rho_{i,j} = \sqrt{(x^{f1} - x^{f2})^2 + (y^{f1} - y^{f2})^2}$ e indica la distanza tra due diversi robot f1 e f2 facenti parte di un insieme $F = \{f1..n\}$ e R_c è il raggio del disco circolare, ovvero dell'area in cui avviene lo spostamento del robot. (Fig. 8)

In conclusione, si può calcolare il numero di collisioni per ogni robot nell'unità di tempo come la somma del numero di viaggi in cui si verifica una collisione rapportato al travel time del veicolo.

$$NC_f = \frac{\sum_{T=1}^n [(\rho_{i,j} \leq R_c) = 1]}{TT}$$

Per analogia, il numero di collisioni totali all'interno del magazzino è dato dal prodotto del numero di collisioni che si verifica per ogni robot per il numero totale di robot presenti nel magazzino:

$$NC = NC_f * AGV$$

4.5.5 Traffico presente nel magazzino

Questo indice indica il numero di AGV che sono presenti contemporaneamente all'interno del magazzino. Deve essere determinato tenendo in considerazione fattori che dipendono strettamente anche da scelte strategiche aziendali: decisioni economiche su quanto investire nella creazione del magazzino automatico e quale quota destinare agli AGV; la quantità di unità da trasportare quotidianamente; la capacità di traffico massima che può essere presente all'interno del magazzino; lo spazio libero che hanno a disposizione i veicoli quando questi non sono utilizzati; il numero di stazioni di ricarica di cui si dispone.

Il traffico presente all'interno di un settore può essere calcolato come:

$$T_i = \frac{Y_i(r)}{C_i - Y_i(r)} \text{ (Digani, 2015)}$$

Dove $Y_i(r)$ è il numero di AGV che stanno operando nel settore r e C_i la capacità di quest'ultimo in termini di numero di veicoli che può contenere.

KPI Description	
Content:	
Name	Traffico presente nel magazzino (T_i)
ID	
Description	L'indice AGV contenuti indica il numero massimo di AGV che possono essere presenti contemporaneamente all'interno del magazzino.
Scope	Production plant
Formula	$T_i = \frac{Y_i(k)}{C_i - Y_i(k)}$
Unit of measure	Percentuale
Range	0-100%
Trend	Maggiore è, maggiore è la quantità di AGV che si possono inserire
Context:	
Timing	Su richiesta
Audience	Supervisore, management

TABELLA 35 TRAFFICO PRESENTE NEL MAGAZZINO

Per fare in modo che l'elevata dinamicità dei magazzini sia gestita in maniera ottimale, ogni volta che un nuovo veicolo inizia ad operare nel settore, un sistema automatizzato ricalcola il livello di traffico presente nella zona considerata, fa in modo che questa sia regolata e che il planning dei veicoli sia riaggiornato. (Digani, 2015)

Nello studio di Hvezda et all. (Hvězda, 2018) si analizza un algoritmo (CARP) il quale permette di determinare quale sia la distanza media che si deve mantenere tra i veicoli in determinate posizioni.

La formula ricavata nello studio è

$$d(a_i, a_j) = \frac{\sum_{\tau=\tau_S}^{\tau_G} |t_i(\tau), t_j(\tau)|}{\tau_G - \tau_S}$$

dove $t_i(\tau)$ è la posizione di a_i al tempo τ e segue la traiettoria t_i , $t_j(\tau)$ è la posizione di a_j al tempo τ e segue la traiettoria t_j e τ_G, τ_S rappresentano l'intervallo di tempo in cui a_i e a_j si muovono.

5 Analisi delle variabili

In questo capitolo è stata fatta un'analisi delle variabili che compongono gli indici studiati precedentemente e si è messo in evidenza quali siano quelle che maggiormente influenzano le performance del magazzino.

Per iniziare, tutte le formule utilizzate per il calcolo degli indici sono state allineate con l'obiettivo di creare un insieme di variabili che fossero condivise; infatti, poiché le formule sono state ricavate da lavori non collegati tra loro, spesso erano presenti variabili diverse che indicavano lo stesso valore.

Una volta allineate, sono state evidenziate, per ogni KPI, le variabili che impattano sul suo risultato finale: questa considerazione è stata possibile studiando le singole formule e valutando le variabili che le componevano. Laddove il calcolo di un KPI fosse influenzato da un altro indicatore, si è deciso di scomporlo nelle sue variabili e di valutare come queste influenzassero il KPI considerato. (Per esempio, la stock rotation è calcolata come il rapporto tra il throughput e l'average inventory, perciò, per avere una visione più chiara, si è valutata la stock rotation come influenzata dalle singole variabili che compongono il throughput).

Successivamente, per ogni variabile, è stato calcolato il numero di indicatori (sui quali ha un effetto) e la percentuale di influenza che ha nel magazzino, data, quest'ultima, dal rapporto tra il numero di indicatori influenzati e il numero totale di indicatori studiati.

La metodologia utilizzata in questa fase dello studio è stata quella di creare un foglio excel in cui erano presenti tutte le variabili nelle colonne e tutti i KPI nelle righe. Grazie alle formule impostate nel dato foglio di calcolo è stato possibile evidenziarle, analizzarle singolarmente e classificarle in base alla capacità che hanno di influenzare le performance del magazzino e, di conseguenza, le decisioni aziendali.

[Figura 11, 12, 13A, 13B]

Il numero totale di variabili che sono state valutate è 71 ed è risultato che 21 di queste hanno un effetto su almeno due indici. Le rimanenti 50 riscontrano solo un effetto diretto sull'indice per il quale sono state studiate, con una percentuale di influenza del 3,03%, e per questo motivo non sono state approfondite in questa analisi.

Infine, è stata effettuata un'ulteriore analisi per valutare quante variabili influenzano il singolo indice. È apparso che dieci KPI sono influenzati da almeno sei variabili al contrario dei rimanenti 23, che ne presentano un numero ridotto (mediamente inferiore a tre). In seguito a questo risultato, è stato valutato se questi indici fossero appartenenti ad una determinata categoria o tipologia di variabile con il fine di stabilire se fosse possibile mettere in evidenza una classe di variabili o di indici su cui è importante porre maggiore attenzione per l'ottimizzazione delle performance del magazzino.

5.1 Classificazione e discussione

Di seguito viene svolta l'analisi delle singole variabili per poter evidenziare quali siano gli indici sui quali hanno maggiore influenza e valutare come si modifichino le performance in base alle loro variazioni.

Le variabili sono state suddivise in tre sottogruppi:

- i. Fortemente influenti nel caso in cui influenzino almeno cinque indici;
- ii. Mediamente influenti nel caso in cui influenzino tra i quattro e i due indici;
- iii. Poco influenti se hanno effetto su un unico indice; in quest'ultimo caso non è stato approfondito il loro studio in quanto una loro variazione porta solo ad una diretta variazione dell'indice a cui fa riferimento.

5.1.1 Variabili con influenza forte

Nome variabile	Percentuale di influenza	N° indici influenzati
Tempo di attesa	33,3%	11
Tempo movimentazione unità	27,3%	9
N° item	24,3%	8
Velocità spostamento orizzontale	21,2%	7
Tempo spostamento carrello elevatore	18,2%	6
Tempo posizionamento forca	18,2%	6
Tempo addizionale	18,2%	6
Velocità verticale	15,2%	5
Location verticale	15,2%	5
Location orizzontale	15,2%	5

TABELLA 36 VARIABILI CON INFLUENZA ALTA

In questo sottogruppo sono state inserite le variabili che hanno un impatto sul calcolo di almeno quattro KPI e una percentuale di influenza di almeno il 15,2%. Queste sono:

- **Tempo di attesa (W_x):** rappresenta il tempo di attesa in cui si incorre nella picking station x prima di poter svolgere una operazione. Ha una percentuale di influenza del 33,3% e ha impatto su 11 KPI. Gli indici influenzati sono: tempo di attesa e code, numero di veicoli, throughput; cycle time e tempo di funzionamento (proporzionale al CT); ricettività (proporzionale a J_4); costo di manutenzione, stock rotation, picco di utilizzo (proporzionali al TH); numero di collisioni e traffico presente nel magazzino. A seguito di un'analisi più attenta risulta però che gli indici direttamente influenzati sono solo i primi tre, tutti gli altri lo sono indirettamente in quanto correlati con essi.

Una riduzione del tempo di attesa permette un miglioramento dei tempi e del throughput e dunque un miglioramento delle performance del magazzino; si riduce inoltre anche il numero di AGV da inserire e dunque il numero delle collisioni e il traffico.

- **Tempo di movimentazione unità (T_n^k):** indica il tempo necessario per poter spostare un item da una posizione alla successiva. Ha una percentuale di influenza del 27,3% e ha impatto su 9 indici. Quattro di questi sono indici di tempo: task time, cycle time storage and retrieval time e il travel time, che a sua volta ha un impatto inversamente diretto sul numero di collisioni. Inoltre, questa variabile influenza anche il throughput e di conseguenza il costo della manutenzione, la stock rotation e il picco di utilizzo.

Da un'analisi delle formule di questi indici risulta che minore è il T_n^k , maggiore è l'efficienza del magazzino.

- **Il numero di item:** rappresenta il numero di unità che vengono elaborate nel magazzino. Ha una percentuale di 24,2% e un numero totale di 8 KPI influenzati. Il motivo di questo risultato è dovuto al fatto che, maggiore è il numero di unità elaborate all'interno del magazzino, maggiore sarà l'attività del magazzino e questo ha un forte effetto sia sull'organizzazione dei tempi che sulle decisioni riguardanti gli AGV e indici di tipo qualitativo. Nello specifico, gli indici influenzati sono: task time, cycle time, costo di manutenzione, throughput, stock rotation, picco di utilizzo ed efficacia nel riconoscere gli item.

Un aumento del numero di item causa un aumento sui KPI che sono interessati da questa variabile, ma è anche sinonimo di una buona attività del magazzino.

- **Velocità orizzontale (v_h):** è la velocità con cui un AGV si muove tra una posizione e quella successiva. Ha una percentuale di influenza del 21,2% e ha impatto su 7 indici: cycle time, travel time, picking orders time, tempo di accesso alla stazione di ricarica, ricettività e numero di collisioni.

Per i primi quattro indici, maggiore è la velocità orizzontale, maggiore è il livello di ottimizzazione dei tempi e di conseguenza aumenta anche la ricettività; per il numero di collisioni, al contrario, minore è la velocità minore è il numero di collisioni che si verificano. Sarà dunque necessario effettuare un trade-off tra queste due considerazioni per valutare quale sia la velocità ottima per gli spostamenti.

È stato specificato il termine orizzontale in quanto, in questo lavoro, sono anche calcolati degli indici che prevedono spostamenti verticali tramite il traslo elevatore.

- **Tempo di spostamento del carrello elevatore (t_{p1}):** rappresenta il tempo necessario al carrello elevatore per spostarsi tra due posizioni. Ha una percentuale di influenza del 18,2% e ha impatto su 6 indici: task time, storage and retrieval time e throughput il quale a sua volta influenza il costo di manutenzione, la stock rotation e il picco di utilizzo. Per tutti questi KPI minore è il tempo impiegato del carrello elevatore per gli spostamenti, maggiore è l'ottimizzazione delle performance del magazzino.
- **Tempo necessario per il posizionamento della forza (t_f):** rappresenta il tempo impiegato dalla forza per sistemarsi nella posizione corretta per poter estrarre l'item dalla sua postazione. Presenta una percentuale di influenza del 18,2% e influenza 6 KPI. Ha un impatto diretto sul task time e sullo storage and retrieval time il quale a sua volta influenza il throughput. Per gli stessi motivi visti nelle variabili precedenti, una variazione di t_f ha effetto anche sul costo di manutenzione, sulla stock rotation e sul picco di utilizzo.

Per poter migliorare le performance del magazzino, è importante che il tempo di posizionamento della forza sia ridotto al minimo.

- **Tempo addizionale (t_a):** questa variabile considera un tempo addizionale che potrebbe verificarsi durante lo svolgimento delle operazioni dovuto a ritardi umani, di produzione o altri imprevisti che si verificano. Anche per t_a la percentuale di influenza è 18,2% e ha effetto sugli stessi indici di t_f , con la stessa modalità. Per tale motivo, per questa variabile valgono le considerazioni fatte al punto precedente.

- **velocità verticale (v_v):** questa variabile indica la velocità verticale con cui si muove il traslo elevatore. Presenta una percentuale di influenza del 15,2% e ha un impatto su 5 indici dei quali tre sono principalmente appartenenti alla categoria dei KPI relativi al tempo (cycle time, travel time, tempo di funzionamento), uno è la ricettività (inversamente proporzionale al tempo di funzionamento) e, infine, il numero di collisioni (inversamente proporzionale al TT).

Dallo studio di queste relazioni è stato possibile riscontrare che un aumento della velocità verticale porta ad un miglioramento dei tempi e della ricettività, ma anche ad un aumento del numero di collisioni.

INDICI	v_h	v_v	dl	jh	W_x	t_{p1}	t_f	t_a	n° item	$r_n^{(R)}$
Task time						x	x	x	x	x
Cycle time	x	x	x	x	x				x	x
Travel time	x	x	x	x						x
Storage and retrieve time						x	x	x		x
Picking orders time	x									
Tempo funzionamento	x	x	x	x	x					
Tempo di attesa e code					x					
Tempo di ricarica della batteria										
Tempo di acceso alla stazione di ricarica	x									
Costi di investimento e gestione										
Costo di gestione del personale										
Costo di manuezione					x	x	x	x	x	x
Costo di inventario										
Inventory turnover										
Coefficiente di utilizzo volumetrico										
Coefficiente di utilizzo superficiale										
Spazio libero										
Temperatura										
Throughput					x	x	x	x	x	x
Collo di bottiglia										
Errore medio										
Stock rotation					x	x	x	x	x	x
Utilizzo scaffali									x	
Utilizzo medio risorse										
Selettività										
Ricettività	x	x	x	x	x					
Consumo di energia										
Picco di utilizzo					x	x	x	x	x	x
Numero veicoli					x					
Efficacia nel riconoscere gli item									x	
Autonomia batteria del veicolo										
Numero di collisioni	x	x	x	x	x					x
Traffico presente nel magazzino					x					
TOT	7	5	5	5	11	6	6	6	8	9
% influenza su 33 indici	21,2%	15,2%	15,2%	15,2%	33,3%	18,2%	18,2%	18,2%	24,2%	27,3%

FIGURA 11 RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DEI KPI INFLUENZATI DA VARIABILI CON INFLUENZA ALTA

- **Location orizzontale (dl):** indica le coordinate orizzontali della postazione in cui deve essere eseguito il prelievo. Ha una percentuale di influenza del 15,2% e ha effetto su 5 indici che sono gli stessi analizzati sopra. Con un'analisi più attenta si è notato che dl è utilizzata direttamente solo per il calcolo del travel time il quale poi causa delle variazioni del cycle time, del tempo attesa e code, della ricettività e del numero collisioni. Un aumento della distanza della location orizzontale causa un aumento di tutti questi KPI; è perciò opportuno ridurla.
- **Locazioni verticale (jh):** indica le coordinate verticali della postazione in cui deve essere eseguito il prelievo. Anche per questa variabile valgono le stesse considerazioni fatte al punto precedente.

5.1.2 Variabili con influenza media

Nome variabile	Percentuale di influenza	N° indici influenzati
N° task	12,1%	4
N° picking stations	12,1%	4
N° lotti	12,1%	4
Velocità di prelievo	9,1%	3
Tempo elaborazione operazione	9,1%	3
Tempo di carico/scarico	9,1%	3
Tempo di attività del raccoglitore	9,1%	3
Distanza percorsa	6,1%	2
Charging rate	6,1%	2
Discount rate	6,1%	2
m^2 utilizzati	6,1%	2

TABELLA 37 VARIABILI CON INFLUENZA MEDIA

Le variabili descritte in questo punto [Tabella 37] sono in grado di influenza dai quattro ai due indici e hanno una percentuale di influenza compresa tra 9,1% e 6,1%. In ordine, sono:

- **Numero di task (k):** il numero di task rappresenta il totale delle operazioni che avvengono all'interno del magazzino e che devono essere svolte per il completamento di una determinata operazione. Ha una percentuale di influenza del 12,1% e ha impatto su un totale di quattro indici. Questi sono: task time, tempo di funzionamento, collo di bottiglia e ricettività. I due indici di tempo aumentano all'aumentare del numero di task; al contrario il collo di bottiglia e la ricettività diminuiscono all'aumentare di k. Da questa analisi è risultato dunque che una riduzione del numero di task ha un impatto positivo sui tempi e sul collo di bottiglia, ma è negativo per la ricettività del magazzino che è inversamente proporzionale al tempo di funzionamento. È dunque necessario effettuare un trade-off tra queste due situazioni per poter scegliere la soluzione ottimale.
- **Numero di picking station (x):** indica il numero di stazioni in cui possono essere consegnati e prelevati gli item presenti nel magazzino. La sua percentuale di influenza è 12,1% e ha un impatto su 4 indici che sono il tempo di attesa e code, il numero di veicoli, il numero di collisioni e il traffico presente nel magazzino. Il tempo di attesa e code aumenta al crescere del numero di picking stations e, essendo il numero di AGV direttamente proporzionale ad esso, aumenta anche il numero di veicoli che ottimizza le prestazioni del magazzino. Un aumento del numero di robot porta però ad un incremento del traffico e delle collisioni che si verificano durante lo svolgimento delle operazioni. Per questo motivo, anche per questa variabile, è opportuno effettuare un trade-off.
- **Numero di lotti (b):** rappresenta il numero di lotti che si creano nella gestione degli item. Ha una percentuale di influenza del 12,1% e ha effetto su quattro indici, nello specifico gli stessi analizzati nel punto precedente. Per la valutazione di questa variabile valgono le stesse considerazioni fatte per il numero di picking station.
- **Velocità di prelievo (v_p):** indica la velocità di prelievo del traslo elevatore. Presenta una percentuale di influenza del 9,1% e influenza 3 indici, nello specifico il task time, il cycle time e la ricettività. I primi due KPI presentano nella loro formula il tempo di attesa (calcolato come il prodotto tra la velocità di prelievo e il numero di item) e per questo motivo un incremento di v_p porta ad un loro miglioramento. La ricettività è inversamente proporzionale al CT, perciò, una sua riduzione permette un incremento delle unità stoccate nel magazzino.
- **Tempo elaborazione operazione (t_e):** esprime il tempo necessario per elaborare come svolgere al meglio un'operazione. Influenza 3 indici con una percentuale del 9,1%. Questi sono lo storage and retrieval time, il cycle time e, per lo stesso motivo analizzato al punto precedente, la ricettività.

Per ottenere un miglioramento delle performance del magazzino, si deve lavorare sulla minimizzazione di questa variabile.

- **Tempo di carico/scarico ($t_{c/s}$):** indica il tempo necessario per il carico e scarico delle unità. La percentuale di influenza è di 9,1% e gli indici su cui ha effetto sono gli stessi analizzati al punto precedente. Per questo motivo le considerazioni riguardo la variazione di $t_{c/s}$ sono invariate rispetto a quelle fatte per t_e .

INDICI	v_p	D_p	t_e	$t_{c/s}$	T_{s_i}	cr	n° task	n° p. stat.	n° lotti	r	m^2 utilizzati
Task time	x						x				
Cycle time	x		x	x	x						
Travel time											
Storage and retrieve time											
Picking orders time		x									
Tempo funzionamento			x	x	x		x				
Tempo di attesa e code								x	x		
Tempo di ricarica della batteria						x					
Tempo di acceso alla stazione di ricarica											
Costi di investimento e gestione											
Costo di gestione del personale										x	
Costo di manutenzione										x	
Costo di inventario											
Inventory turnover											
Coefficiente di utilizzo volumetrico											
Coefficiente di utilizzo superficiale											x
Spazio libero											x
Temperatura											
Throughput											
Collo di bottiglia		x					x				
Errore medio											
Stock rotation											
Utilizzo scaffali											
Utilizzo medio risorse											
Selettività											
Ricettività	x		x	x	x		x				
Consumo di energia											
Picco di utilizzo											
Numero veicoli								x	x		
Efficacia nel riconoscere gli item											
Autonomia batteria del veicolo						x					
Numero di collisioni								x	x		
Traffico presente nel magazzino								x	x		
TOT	3	2	3	3	3	2	4	4	4	2	2
% influenza su 33 indici	9,1%	6,1%	9,1%	9,1%	9,1%	6,1%	12,1%	12,1%	12,1%	6,1%	6,1%

FIGURA 12 RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DEI KPI INFLUENZATI DA VARIABILI CON INFLUENZA MEDIA

- **Tempo di attività del raccoglitore (E[mission time]):** è il tempo impiegato da un raccoglitore per completare un'operazione. Ha una percentuale di influenza del 9,1% e ha impatto su 3 indici: numero di veicoli, numero di collisioni e traffico nel magazzino. Dall'analisi delle formule

utilizzate per il calcolo di questi KPI è risultato che al suo aumentare si riduce il numero di AGV e, dunque, anche il traffico e le collisioni.

- **Distanza percorsa (D_p):** è la distanza percorsa dal veicolo durante uno spostamento tra due posizioni. Ha una percentuale di influenza del 6,1% e 2 indici: picking order time e collo di bottiglia. Per entrambi, un aumento della distanza percorsa causa un peggioramento delle prestazioni pertanto è opportuna ridurla il più possibile.
- **Charging rate (cr):** rappresenta il tasso di ricarica richiesto dalla batteria degli AGV in fase, appunto, di ricarica. Anche in questo caso la percentuale è del 6,1% e gli indici interessati sono due: il tempo di ricarica della batteria e la sua autonomia. Maggiore è la cr, minori sono i valori dei KPI di riferimento, con un miglioramento delle performance.
- **Discount rate (r):** per questa variabile la percentuale di impatto risulta essere del 6,1% e il numero degli indici su cui ha effetto è 2. Questi ultimi sono il costo di manutenzione e il costo del personale, infatti, essendo due KPI che vengono calcolati su un orizzonte temporale di più anni, un aumento di r porta ad una riduzione dei costi in modo esponenziale.
- **m^2 utilizzati:** anche per questa variabile la percentuale è 6,1% e il numero di KPI influenzati è 2. Nello specifico, sono il coefficiente di utilizzo superficiale e lo spazio libero. Per entrambi, un aumento dei m^2 utilizzati porta ad un aumento del loro valore. Nel caso del coefficiente di utilizzo superficiale questo risultato è positivo in quanto indica una buona ottimizzazione degli spazi. Al contrario, un aumento dello spazio libero potrebbe essere negativo in quanto indica che alcuni spazi non sono sfruttati, ma se inserito nel contesto del magazzino automatico questo è spesso voluto per poter garantire uno svolgimento ottimale delle operazioni da parte dei robot, con l'obiettivo di ridurre il traffico e il numero di collisioni.

5.1.3 Altre variabili

Queste variabili sono direttamente relazionate con un unico indice e presentano tutte una percentuale di influenza del 3%. Non sono state analizzate nel dettaglio in quanto non hanno un impatto generale su tutto il sistema di gestione del magazzino, ma sono responsabili solo delle performance del KPI a cui fanno riferimento. Di seguito [Tabella 38] è presente un elenco con tutte le variabili che fanno parte di questo gruppo, descritte anche tramite il loro simbolo, la percentuale di influenza e il numero di indici influenzati.

Simbolo	Nome variabile	Percentuale di influenza	N° indici influenzati
a_{agv}	Posizione AGV quando la batteria è scarica	3%	1
a_{sr}	Posizione stazione di ricarica	3%	1
$b_v^{current}$	Livello attuale della batteria	3%	1
b^{full}	Livello massimo di carica	3%	1
b_u	Percentuale di capacità utilizzabile della batteria	3%	1
Dr	Discharging rate	3%	1
TBF_i	Tempo medio tra due errori	3%	1
FE	Istanza di errore	3%	1
V_n^k	Prodotto tra velocità estrazione e numero di item da estrarre in k	3%	1
C_1	Costo dei muri	3%	1
C_2	Costo della struttura	3%	1
C_3	Costo del trasportatore	3%	1
C_4	Costo dei buffer di input/output	3%	1
C_5	Costo delle fondamenta e del tetto	3%	1
C_6	Costo del traslo elevatore	3%	1
C_7	Costi ulteriori	3%	1
S	Salario annuale	3%	1
PC	Quota percentuale di elevatori che necessitano manutenzione	3%	1
AHC	Costo annuale di mantenimento	3%	1
AOC	Costo annuale di acquisizione	3%	1
COGS	Costo di produzione delle unità vendute	3%	1
V_{max}	Volume massimo	3%	1
m^3 utilizzati	Metri cubi utilizzati	3%	1

C_{area}	Metri quadri disponibili per il magazzino	3%	1
NB_k	Numero unità vendute nell'area r	3%	1
H_{jk}	Numero giorni per il calcolo della temperatura	3%	1
R_{jk}	Numero di giorni di pioggia in un mese	3%	1
$V_{Ll,i}$	Volume item	3%	1
$V_{SC,i}$	Volume zona di stoccaggio	3%	1
H_u	Utilizzo orario delle risorse	3%	1
Availability	Disponibilità risorse	3%	1
N° celle	Numero di celle	3%	1
N° celle direttamente accessibili	-	3%	1
D_w	Tempo totale di ispezione per l'azione	3%	1
M	Coeff. Globale sbilanciato di sistema	3%	1
N_{in}	N° di item ricevuto nell'unità di tempo	3%	1
P	Numero di casi elaborati	3%	1
μ	Coefficiente globale sbilanciato del sistema		
B	N° lotti da creare	3%	1
e_{bstr}^p	Energia consumata	3%	1
e_{bs}^x	Energia necessaria per movimentare un'unità	3%	1
$e_l^{z\uparrow}, e_l^{z\downarrow}$	Energia richiesta per le traiettorie in fase ascendente e discendente	3%	1
e_r^{belt}	Energia consumata tra punto c/s e quello di consegna	3%	1
m_p	Massa prodotto	3%	1

m^{SH}	Massa veicolo	3%	1
m^{SC}	Massa della colonna posta a supporto del veicolo	3%	1
OLB	Latenza operativa	3%	1
$\rho_{i,j}$	Distanza tra due robot	3%	1
R_c	Raggio del disco circolare	3%	1
N° item riconosciuti	-	3%	1
C_i	Numero veicoli contenuti nel settore r	3%	1

TABELLA 38 VARIABILI CON INFLUENZA BASSA

INDICI	b_u	d_r	TBF_i	FE	$V_n^{(k)}$	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	S	PC	AHC	AOC	COGS	V_{max}	m^3 utilizzati	
Task time					*															
Cycle time																				
Travel time																				
Storage and retrieve time																				
Picking orders time																				
Tempo funzionamento																				
Tempo di attesa e code																				
Tempo di ricarica della batteria																				
Tempo di acceso alla stazione di ricarica																				
Costi di investimento e gestione						*	*	*	*	*	*	*								
Costo di gestione del personale													*							
Costo di manutenzione														*						
Costo di inventario															*	*				
Inventory turnover																	*			
Coefficiente di utilizzo volumetrico																		*	*	
Coefficiente di utilizzo superficiale																				
Spazio libero																				
Temperatura																				
Throughput																				
Collo di bottiglia																				
Errore medio			*	*																
Stock rotation																				
Utilizzo scaffali																				
Utilizzo medio risorse																				
Selettività																				
Ricettività																				
Consumo di energia																				
Picco di utilizzo																				
Numero veicoli																				
Efficacia nel riconoscere gli item																				
Autonomia batteria del veicolo	*	*																		
Numero di collisioni																				
Traffico presente nel magazzino																				
TOT	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
% influenza su 33 indici	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%

FIGURA 13A RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DEI KPI INFLUENZATI DA VARIABILI CON INFLUENZA BASSA

INDICI	C_{atted}	NB_k	H_{Rk}	R_{Rk}	$V_{ij,i}$	$V_{SC,i}$	H_{ta}	Availability	n' celle	D_w	μ	N_{Tm}	P	b	e	m	OLB	n' item riconosciuti	$\rho_{i,j}$	R_c	C_i	Var. TOT
Task time																						8
Cycle time																						11
Travel time																						5
Storage and retrieve time																						4
Picking orders time																						2
Tempo funzionamento																						9
Tempo di attesa e code																						3
Tempo di ricarica della batteria																						3
Tempo di acceso alla stazione di ricarica																						3
Costi di investimento e gestione																						7
Costo di gestione del personale																						2
Costo di manutenzione																						8
Costo di inventario																						2
Inventory turnover																						2
Coefficiente di utilizzo volumetrico																						2
Coefficiente di utilizzo superficiale																						2
Spazio libero	*																					2
Temperatura		*	*	*																		3
Throughput																						6
Collo di bottiglia																						2
Errore medio																						2
Stock rotation																						7
Utilizzo scaffali					*	*																3
Utilizzo medio risorse							*	*														2
Selettività									*													2
Ricettività										*	*	*	*	*	*							15
Consumo di energia															*	*						2
Picco di utilizzo																	*					7
Numero veicoli																						4
Efficacia nel riconoscere gli item																		*				2
Autonomia batteria del veicolo																						3
Numero di collisioni																			*	*		11
Traffico presente nel magazzino																					*	5
TOT	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
% influenza su 33 indici	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	

FIGURA 14B RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DEI KPI INFLUENZATI DA VARIABILI CON INFLUENZA BASSA

5.2 Analisi indici maggiormente influenzati

KPI	Categoria	N° variabili
Ricettività	Qualità	15
Cycle time	Tempo	11
Numero di Collisioni	Efficienza AGV	11
Tempo di funzionamento	Tempo	9
Task time	Tempo	8
Costo di manutenzione	Economico	8
Stock Rotation	Qualità	7
Picco di Utilizzo	Qualità	7
Costi di investimento	Economico	7
Throughput	Qualità	6

TABELLA 39 KPI MAGGIORMENTE INFLUENZATI

A valle dell'analisi delle singole variabili, ci si è soffermati sullo studio degli indici che sono influenzati da un numero di variabili superiori a sei: questo valore è stato messo come limite in quanto si è notato un distacco rispetto a tutti gli altri KPI (per i quali le variabili erano mediamente tra due e quattro).

Si è deciso di studiare questi KPI per valutare se ci siano delle motivazioni particolari che portino ad un tasso di influenza maggiore rispetto alla media o se ci siano delle correlazioni con la categoria di cui essi fanno parte. Nella tabella 41 è presente l'elenco dei KPI su cui è stata svolta questa valutazione, la categoria di cui fa parte e il numero di variabili che lo influenzano.

I costi di investimento presentano un valore così alto solo per come è strutturata la formula matematica che permette di calcolarli (sette variabili utilizzate esclusivamente per il calcolo del dato indice); per questo motivo è risultato che la forte influenza da parte delle variabili non è motivata dall'impatto che questo indice ha sulle performance del magazzino o dal legame con altri indici.

Per i nove indicatori rimanenti, studiate le loro correlazioni, è risultato che solo tre di questi sono indipendenti dagli altri: il task time, il throughput e il numero di collisioni.

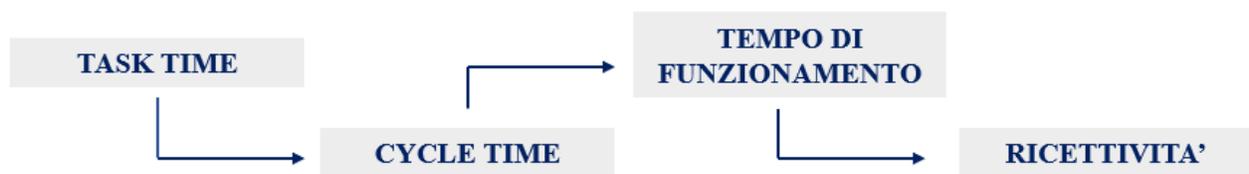


FIGURA 15 RELAZIONE TRA INDICI RISPETTO AL TASK TIME

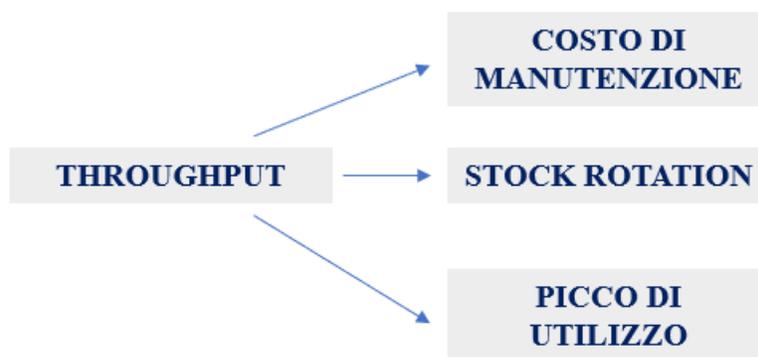


FIGURA 16 RELAZIONI INDICI RISPETTO AL THROUGHPUT

Come si evince dalla figura 15, una variazione del task time si riflette sul cycle time e di conseguenza sul tempo di funzionamento e sulla ricettività, la quale risulta infatti essere dipendente dal numero maggiore di variabili. Ovviamente, non tutte queste hanno un effetto diretto (sono solo sei le variabili

presenti nella formula della ricettività), ma a seguito della variazione dei tre KPI citati, si ha un impatto finale anche su di essa.

Allo stesso modo, una variazione del throughput porta ad un cambiamento degli indici di stock rotation, del picco di utilizzo e del costo di manutenzione: in tutti e tre i casi il TH è contenuto nella formula matematica, creando quindi una dipendenza diretta tra i due indici [figura 16].

L'ultimo KPI da considerare è il numero di collisioni. In questo caso l'alto numero di variabili che lo influenza è dovuto al fatto di essere inversamente proporzionale al travel time, direttamente proporzionale al numero di AGV e influenzato da altre variabili come, ad esempio, il numero di item e di picking stations. Risulta, comunque, che circa la metà delle variabili siano riferite alle tempistiche di svolgimento dei task.

Dunque, svolgendo un'analisi incrociata tra questo risultato e quello ottenuto dall'analisi dell'influenza delle variabili singole, si è arrivati alla conclusione che le variabili che maggiormente influenzano le performance del magazzino, in base ai KPI analizzati in questo lavoro, sono quelle che hanno un effetto sui tempi di svolgimento di tutte le operazioni (spostamenti, svolgimento task, etc.). Oltre a queste, particolare attenzione dovrebbe essere rivolta anche al numero di item presenti nel magazzino, il quale ha un impatto su un alto numero di indici, come evidenziato nell'analisi. Si ritiene, però, che quest'ultima sia comunque dipendente anche da fattori esterni quali la grandezza dell'azienda per cui è creato il magazzino, la tipologia di mercato che viene servito e di prodotto venduto ed altri elementi che non dipendono dalle performance del AWS.

Per quanto riguarda, invece, la suddivisione in categorie, l'analisi dimostra che non ne esiste una che abbia nettamente una maggiore influenza rispetto alle altre sulle performance. Per quest'ultima affermazione è stato considerato il numero di KPI appartenenti ad ogni sottogruppo tra i 10 di cui si è discusso in questa fase dell'analisi rapportato al totale di quelli appartenenti ad ogni categoria.

6 Conclusioni

Questo studio è nato con lo scopo di individuare quali siano i Key Performance Indicators che maggiormente influenzano le decisioni strategiche nella gestione dei magazzini automatici. A tal fine è stata svolta un'analisi basandosi sui lavori presenti in letteratura ed evidenziando quelli che sono gli indici più citati e analizzati.

È stato possibile effettuare una classificazione di tutti gli indici con riferimento alle regole espresse dalla norma ISO 22400 e suddividerli in categorie a seconda dei settori strategici che maggiormente influenzano, con l'obiettivo di rendere più semplice la ricollocazione delle responsabilità di ogni KPI all'interno dell'organizzazione.

Una volta classificati, si è lavorato sulle variabili che ne compongono le formule matematiche. Grazie a questa fase finale sono stati messi in luce gli aspetti sui quali è importante porre maggiore attenzione nella valutazione delle performance. È risultato che le variabili relative ai tempi di svolgimento delle operazioni sono quelle che hanno un impatto maggiore sulle variazioni degli indici e, quindi, sulle decisioni che si prendono all'interno del magazzino.

Ragionando invece sulle cinque categorie in cui sono stati suddivisi i KPI, non è stato possibile evidenziarne una che avesse una influenza maggiore, né una su cui le variabili avessero un maggiore impatto: tutte le categorie risultano essere influenzate in proporzione simile.

Successivi lavori potrebbero concentrarsi sull'analisi di ulteriori indici di performance, così da poter ampliare le conoscenze relative a questo ambito con il fine di apportare nuovi miglioramenti e tecniche di ottimizzazione negli Automated Warehouse Systems.

Di seguito una breve descrizione di alcuni indici che potrebbero essere analizzati in futuro:

- Tempo di inventario: è il tempo richiesto per effettuare un controllo di tutte le unità presenti all'interno del magazzino, così da poter avere una visione reale delle quantità e della loro posizione.
- Costo di prelievo: indica il costo in cui si incorre per l'estrazione delle unità dalle posizioni in cui esse sono stoccate.
- Distanza di viaggio: è il percorso, espresso in termini di spazio, che l'AGV deve percorrere per potersi muovere tra due posizioni all'interno del magazzino per poter svolgere l'operazione a lui assegnata.

- Operatori/ superficie: Il rapporto operatori/superficie indica la percentuale di utilizzo degli operatori che lavorano all'interno del magazzino, rispetto alla superficie utilizzata per la costruzione di quest'ultimo.
- Polvere e sporco: rappresenta la quantità di entrambe queste variabili all'interno del magazzino. Più essa è alta, più questo potrebbe avere un impatto negativo sulla qualità delle unità e sulla movimentazione dei robot.
- Percentuale di automazione: indica quanto nel magazzino automatico risultino implementati dei logaritmi che permettono una gestione il più automatizzata possibile, riducendo la necessità di operatori per svolgere determinate funzioni.
- Umidità: L'indice di umidità deve essere calcolato periodicamente per poter mantenere un'atmosfera che preservi la qualità dei prodotti stoccati e permetta un corretto svolgimento delle operazioni.
- Rumore: indica quale sia il rumore presente all'interno della struttura. Questo può essere causato dalla movimentazione dei materiali o dei macchinari adibiti al trasporto delle unità di carico.
- Latenza di risposta (delay time): esprime quanto sia il ritardo che si verifica per poter soddisfare le richieste del cliente.
- Precisione di ritiro: indica quanto gli AGV siano in grado di svolgere le azioni di prelievo
- Sicurezza lavoratori: esprime come tutelare i lavoratori e la loro sicurezza sul posto di lavoro con l'obiettivo di limitare il numero di infortuni sul posto di lavoro.
- Numero di failure per macchina: rappresenta il numero di fallimenti che si verificano per i macchinari nell'unità di tempo.
- Bilanciamento di stoccaggio: è la capacità di bilanciare la distribuzione delle unità nel magazzino;
- Solver iteration: rappresenta le interazioni effettuate dal sistema per la risoluzione dei problemi;
- Tempo di attività di trasporto umano: è il tempo in cui le unità non sono trasportate tramite AGV, ma grazie al lavoro delle risorse umane;
- Affidabilità algoritmo: indica quanto un algoritmo può essere considerato affidabile nella gestione del magazzino;
- Emissioni: permette di calcolare quale sia l'impatto a livello di emissioni che l'automazione ha nell'ambiente;
- Costo immagazzinamento: rappresenta il costo che di mantenimento delle unità all'interno del magazzino automatico;

- Flessibilità: indica la capacità di adattamento del sistema informatico rispetto alle necessità di gestione del magazzino;
- Ordini evasi/inevasi: è un indice che calcola il rapporto tra il numero di ordini soddisfatti e il numero di ordini totali;
- Tempo di imballaggio: rappresenta il tempo necessario per l'imballaggio di una singola unità o di un lotto affinché possano essere stoccate nel magazzino o possano essere estratte da esso;
- Lead time: è il tempo che intercorre tra il momento in cui è ricevuto l'ordine da parte del cliente fino a quando non lo si consegna;
- Makespan: è il tempo necessario per la produzione di un prodotto o servizio, dall'inizio della sua creazione alla fine;
- Consumo a riposo: indica la quantità di energia consumata quando gli AGV o tutto il sistema automatizzato del magazzino non sono in funzionamento;
- Risparmio energetico: rappresenta la capacità di evitare sprechi energetici durante lo svolgimento delle operazioni;
- Tempo elaborazione operazione: è il tempo necessario per il processamento e l'organizzazione delle singole operazioni da svolgere;
- Planning time: indica il tempo necessario per la pianificazione e organizzazione delle attività;
- Pressione media: rappresenta la pressione che è esercitata sul suolo dai macchinari che operano all'interno del magazzino. È importante che sia tenuta sotto controllo per evitare sovraccarichi che sarebbero dannosi per il suolo.

7 Bibliografia

A Control of Collision and Deadlock Avoidance for Automated Guided Vehicles with a Fault-Tolerance Capability. (s.d.).

A. Causo, Z. C. (2017). Visual marker-guided mobile robot solution for automated item picking in a warehouse. *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, (p. 201-206). Munich, Germany.

A. Kattepur, A. M. (2018). Verification and Timing Analysis of Industry 4.0 Warehouse Automation Workflows. *23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, (p. 1297-1304). Turin, Italy.

Accademy, I. (2019). Tratto da <http://www.iso-academy.it>.

Alejandro Mollá-Descals, I. G.-S.-E.-M. (2009, october 09). Automation of Warehouse Management and Assortment in the Distribution of Durable Goods: An Analysis for the Ceramics and Building Supplies Industry in Spain. *Journal of Marketing Channels*, p. 375-390.

Amato F., B. F. (2005). An approach to control automated warehouse. *Control Engineering Practice*, 1223-1241.

Basile, F. C. (2017). An auction-based approach for the coordination of vehicles in automated warehouse systems. *EEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI)*, (p. 121-126).

Bekris, R. L. (2011). Efficient and complete centralized multirobot path planning. *international Conference on Intelligent Robots and System*, (p. 3268-3275).

Bevilacqua, M. a. (2019). Lean principles for organizing items in an automated storage and retrieval system: an association rule mining – based approach. In *Management and Production Engineering Review* (p. 29-36). Ancona.

Bortolini M., F. M. (2017). Time and energy optimal unit-load assignment for automatic S/R warehouses. *International Journal of Production Economics*.

Cechim, R. G. (2019). *Evaluation of a new intralogistics systems performance*. Torino.

Colling, D. O. (2019). Battery Charging Strategies for AGV Systems. *Logistics Journal : Proceedings*.

D. Roy, A. K. (2009). Impact of zones on throughput and cycle times in warehouses with Autonomous Vehicles. *International Conference on Automation Science and Engineering*, (p. 449-454). Bangalore, India.

Degiovanni, D. (2019). *Progettazione di sistemi di trasport innovativi per magazzini automatici*. Torino.

Didem Cinar, J. A. (2016). Scheduling the truckload operations in automated warehouses with alternative aisles for pallets . *Elsevier*.

Digani, V. S. (2015). A probabilistic eulerian traffic model for the coordination of multiple AGVs in automatic warehouses. *Robotics and Automation Letters*, p. 26-32.

Eder, M. (2020). An approach for performance evaluation of SBS/RS with shuttle vehicles serving multiple tiers of multiple-deep storage rack. *Int J Adv Manuf Technol*, p. 3241–3256.

- Faveto A., T. E. (2020). Development of a key performance indicator framework for automated. *17th IFAC Symposium on Information Control*.
- Fukunari, M. M. (2009). A network queuing approach for evaluation of performance measures in autonomous vehicle storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, 152-167.
- G. Liu, W. Y. (2006). Resource Management with RFID Technology in Automatic Warehouse System. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (p. 3706-3711). Beijing, China.
- Geng, F. G. (2017). Vision-based autonomous docking and re-charging system for mobile robot in warehouse environment. *2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering*, (p. 79-83). Shanghai, China.
- Guilherme T. Aguiar, G. A. (2019). Sustainable Implementation Success Factors of AGVs in the Brazilian Industry Supply Chain Management. In *Procedia Manufacturing* (p. 1577-1586).
- H. Yoshitake, R. K. (2019). New Automated Guided Vehicle System Using Real-Time Holonic Scheduling for Warehouse Picking. 1045-1052.
<http://www.iso-academy.it/norme-en-iso.html>. (s.d.).
- Hvězda, J. R. (2018). Context-aware route planning for automated warehouses. *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, (p. 2955-2960).
- Jiewu Leng, D. Y. (2019). Digital twin-driven joint optimisation of packing and storage assignment in large-scale automated high-rise warehouse product-service system. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*.
- Kam Fai Elvis Tsang, Y. N. (2018). A Novel Warehouse Multi-Robot Automation System with Semi-Complete and Computationally Efficient Path Planning and Adaptive Genetic Task Allocation Algorithms. *15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*.
- Kaveh Azadeh, R. D. (2019). Robotized and Automated Warehouse Systems: Review and Recent Developments. In *Transportation Science* (p. 917-1212). Ahmedabad, India: Informs.
- Kees Jan Roodbergen, I. F. (2009, April 16). A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, p. 343-362.
- Khojasteh, Y. S. (2016). A travel time model for order picking systems in automated warehouses. *Int J Adv Manuf Technol*, 2219–2229.
- Kirsch, C. C. (2011). Global Localization and Position Tracking of an Automated Guided Vehicle. In *IFAC Proceedings Volumes* (p. 14036-14041).
- Lenoble N., F. Y. (2018). Order batching in an automated warehouse with several vertical lift modules: Optimization and experiments with real data. *European Journal of Operational Research*, p. 958-976.
- Liu Y, J. S. (2019). *Multi-objective AGV scheduling in an automatic sorting system of an unmanned (intelligent) warehouse by using two adaptive genetic algorithms and a multi-adaptive genetic algorithm*. Jiaotong: Yong Wang, Chongqing Jiaotong University, CHINA.
- Liu, S. (2018). Research on Scheduling Policy of Automated Warehouse System. *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Application Engineering*.

- Lukas Polten, S. E. (2021). *Scheduling automated guided vehicles in very narrow aisle warehouses*. Omega.
- M. Kulich, T. N. (2019). Push, Stop, and Replan: An Application of Pebble Motion on Graphs to Planning in Automated Warehouses. *Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, (p. 4456-4463). Auckland, New Zealand.
- Manisha Suresh Pingale, H. K. (2019). Design And Development Of Automated Storage And Retrieval System (ASRS) For Warehouse Using IOT And Wireless Communication. *International Journal of Scientific & Technology Research*.
- Meneghetti A., M. L. (2013). *ow Energy Recovery Can Reshape Storage Assignment in Automated Warehouses*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Nastasi, G. C. (2016). Implementation and comparison of algorithms for multi-objective optimization based on genetic algorithms applied to the management of an automated warehouse. *J Intell Manuf*, p. 1545-1557.
- Onanaye, A. S. (2019, February). Cost Implication of Inventory Management in Organised Systems. *International Journal of Engineering and Management Research*.
- Patvichaichod, P. N. (2019). Performance analysis of automatic sprinkler systems in warehouses using fire dynamic simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Shanghai, China: IOP Publishing Ltd.
- Pei Guang Wang, X. M. (2013, September). Picking Route Optimization of Automated Warehouse Based on Improved Genetic Algorithms. *Applied Mechanics and Materials*, p. 2694-2697.
- Qian Wang, R. M. (2010). A RFID-based automated warehouse design. *2nd International Conference on Computer Engineering and Technology*, (p. pp. V6-359-V6-363). Chengdu, China.
- Qin Li, A. P. (2016). A Control of Collision and Deadlock Avoidance for Automated Guided Vehicles with a Fault-Tolerance Capability. *International Journal Of Advanced Robotic Systems*.
- Raptis, M. A. (2015). robotic experimental platform for testing and validating warehouse automation algorithms. *International Conference on Technologies for Practical Robot Applications*, (p. 1-6). Woburn, MA.
- Roelef Hamberg, J. V. (s.d.). Editors automation in warehouse development.
- Roy, D. K. (2015). Stochastic models for unit-load operations in warehouse systems with autonomous vehicles. *Annals of Operations Research*, p. 129-155.
- Santos J., C. P. (2016). Validation of a Time Based Routing Algorithm Using a Realistic Automatic Warehouse Scenario. *Second Iberian Robotics Conference. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham.
- Sharath Jotawar, M. S. (2017). Motion Planning for an Automated Pick and Place Robot in a Retail Warehouse. *Advances in Robotics (AIR 2017)*. Delhi, India.
- Stowe, J. D. (2016). *Throughput optimization of multi-agent robotic automated warehouses*. Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology.

- Sunderesh S. Heragu, X. C. (2011). Analytical models for analysis of automated warehouse material handling systems. *International Journal of Production Research*.
- Wanlei Wang, J. G. (2017). Optimization of Automated Warehouse Location Based on Genetic Algorithm. *2017 2nd International Conference on Control, Automation and Artificial Intelligence*.
- Xie, Q. T. (2009). An Approach for Picking Optimization in Automated Warehouse. *International Conference on Natural Computation*, (p. 362-366). Tianjian, China.
- Yoshitake, H. K. (2019). New automated guided vehicle system using real-time holonic scheduling for warehouse picking. *Robotics and Automation Letters*, p. 1045-1052.
- Zhao, S. W. (2009). Optimization of Goods Location Numbering and Storage and Retrieval Sequence in Automated Warehouse. *International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, (p. 883-886). Sanya; China.
- Zhu, L. J. (2017). Key performance indicators for manufacturing operations management in the process industry. *International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, (p. 969-973).