

Politecnico di Torino

Collegio di Ingegneria Gestionale – Classe LM/31

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria

Gestionale



Politecnico di Torino

Industry 4.0 e Magazzini Automatici: tecnologie automatizzanti dell'industry 4.0 applicate ai magazzini

Relatore:
Prof. Giulio Mangano
Ferrari Andrea

Candidato:
Carloalberto Urbano

Anno Accademico 2022 - 2023

Indice

Introduzione	2
1 Tecnologie	6
1.1 AGV robot.....	6
1.1 ASRS.....	11
1.2 Convogliatori e sistemi di smistamento automatici	17
1.3 Autostore.....	21
1.4 Droni automatici da trasporto	25
1.5 Palletizing robot.....	28
1.6 Picking robot.....	30
2 Metodologia.....	33
2.1 Analisi dei dati	34
3 Correlazione.....	46
3.1 Output correlazione.....	49
4 Previsioni future industry 4.0	54
Sitografia e bibliografia	59

Introduzione

Da molti anni le aziende stanno sperimentando sempre più i benefici generati da tecnologie che permettano loro di velocizzare tutta la catena di produzione e di immagazzinamento, con lo scopo di migliorare le performance aziendali, facilitare il lavoro dei lavoratori e aumentare la customer satisfaction. Questo di lavoro di tesi nasce proprio con l'obiettivo di ricercare quante aziende intraprendono questo percorso di automazione, in particolar modo dei magazzini, dove questi magazzini sono situati e l'investimento sostenuto. Tutto questo sarà svolto per cercare di prevedere, attraverso variabili ricercate, l'andamento futuro degli investimenti e la relazione esistente tra queste variabili e l'investimento effettuato per i magazzini delle imprese, pronosticando così il successo o il fallimento di tecnologie che almeno in questo momento prendono sempre più piede all'interno dei magazzini.

Per iniziare è stato costruito un database in cui si è tenuta traccia dei progetti legati all'industria 4.0 applicati ai magazzini delle varie imprese, a cui è stato assegnato un numero univoco per analizzare approfonditamente e più semplicemente i dati raccolti. Per raggruppare tutti i progetti sono state effettuate ricerche sui principali motori di ricerca e analizzando i case studies dei vari fornitori di tecnologie per automatizzare i magazzini. Le innovazioni prese in considerazione per raggiungere un'automazione (anche parziale) del magazzino sono:

- AGV robot (automated guided vehicles) con il quale effettuare più facilmente la movimentazione dei materiali o dei prodotti finiti. Essi sono in grado di muoversi in autonomia grazie a varie tecnologie quali bande magnetiche applicate al pavimento, segnali GPS, sensori ad infrarossi ecc.;
- ASRS (automated storage and retrieval system) o comunemente chiamato magazzino automatico. Infatti, in questo caso l'operatore dovrà solo registrare sul software il prodotto ed inserirlo sul nastro per fare in modo che il prodotto sia immagazzinato in autonomia nel

proprio scomparto;

- Convogliatori e sistemi di smistamento prodotti automatizzati in grado di velocizzare la consegna del prodotto al cliente. In questo caso i nastri trasportatori e sistemi di lettura codice a barre o QR agiscono contemporaneamente per dare la giusta direzione al prodotto sul nastro e portarlo senza sforzi fisici da parte dell'operatore nel luogo desiderato;
- Autostore in cui dei robot si muovono su di una matrice tridimensionale in cui all'interno ci sono i vani per immagazzinare materiale o prodotti. È una delle migliori soluzioni per aumentare la densità di immagazzinamento e risparmiare spazio;
- Droni automatici da trasporto molto simili agli AGV per lo scopo ma con diversa modalità. Infatti, i droni, una volta caricato il prodotto, volano dal punto A al punto B del magazzino per la consegna del materiale o prodotto, senza intralciare il cammino di eventuali operatori fisici;
- Palletizing robot. Infatti, anche la velocità con cui si effettua la preparazione del prodotto finito sul pallet è sempre più importante e facilita la logistica;
- Picking robot per aumentare la velocità di presa del prodotto o del materiale da magazzino, senza eventualmente utilizzare i più ingombranti carrelli elevatori;

Dopo aver compreso e registrato tutte le possibili innovazioni, si è reso necessario capire in che misura queste tecnologie aiutassero impresa e lavoratori. Allo scopo si è tenuta traccia di tutti i benefici che tali tecnologie hanno apportato. Tali benefici sono stati espressi sia in termini qualitativi che quantitativi:

- Aumento produttività quando la tecnologia ha permesso all'impresa di produrre (a parità di tempo) più prodotti dello stesso tipo;
- Maggior efficienza picking in quanto tale operazione può essere oggetto di ritardi e di ulteriore fatica per l'operatore;

- Maggior sicurezza nel caso le operazioni pericolose sono ora affidate ai robot, diminuendo la probabilità di infortuni;
- Ottimizzazione risorse quando, dopo l'introduzione della tecnologia, l'impresa è stata in grado di utilizzare in maniera più efficiente le risorse a sua disposizione, aumentando di conseguenza la produttività;
- Ottimizzazione spazio se, dopo aver introdotto la tecnologia, l'impresa ha registrato un aumento di prodotti immagazzinati nello stesso spazio utilizzato in precedenza;
- Riduzione costi se permette all'impresa di risparmiare sulle risorse o sull'energia utilizzata;
- Riduzione forza sismica quando la nuova tecnologia permette di aumentare la sicurezza del magazzino posto in una zona con una particolare propensione ai terremoti;
- Riduzione sforzo fisico qualora l'operatore non sia più incaricato di occuparsi della movimentazione di carichi pesanti o di movimenti ripetitivi, permettendo inoltre all'impresa di utilizzarli altrove e ottimizzare la gestione delle risorse
- Una maggior velocità di processo se il prodotto grazie all'innovazione riesce ad arrivare come al cliente in minor tempo;

Successivamente si è dovuto tener traccia anche del Paese in cui tali imprese avviavano progetti di automatizzazione del magazzino, potendo così effettuare statistiche rilevanti partendo dall'ambiente e dal tessuto economico in cui ogni impresa è stata inserita. Per questo motivo, sono stati rintracciati alcuni indicatori riferiti ad ogni Paese:

- Popolazione
- PIL nominale
- PIL pro capite
- Crescita annua PIL
- Inflazione

- Spread
- Tassa sui profitti
- Credito concesso al settore privato
- Investimenti stranieri
- Investimenti in ricerca e sviluppo
- Valore aggiunto dell'industria
- Spesa per l'istruzione
- Tempo medio di costruzione magazzini
- Logistics performance index

Tutti questi indicatori sono stati selezionati a partire dal world development indicators (WDI) che è possibile recuperare liberamente dal sito The World Bank, che registra serie storiche di gran parte dei paesi nel Mondo. Oltre ai singoli paesi, il WDI registra anche gli indicatori per area geografica, come ad esempio l'Europa, zona sud ed est dell'Africa, Asia centrale e Asia dell'est ecc. Per semplicità sono stati eliminati tutti i paesi in cui non sono state registrate innovazione nell'ambito dell'industria 4.0 per i magazzini, tenendo solo quelli in cui le imprese hanno già avviato progetti. Sono presenti nel WDI numerosi indicatori per ogni Paese, seguendo una lunga serie storica. Ovviamente tra tutti gli indicatori sono stati selezionati solo quelli affini allo studio in esame e che possono in qualche modo essere legati alla quantità di investimenti fatti in tecnologie per l'automazione del magazzino delle imprese.

I risultati ottenuti dopo il lavoro, sebbene diversi dalle aspettative iniziali, possono spiegare con discreta precisione l'andamento degli investimenti nelle tecnologie che abilitano il magazzino all'automazione, almeno nei paesi più sviluppati. Si nota infatti che in questi ultimi, dove l'economia è più fiorente, con investimenti maggiori specialmente nell'istruzione e nella ricerca e sviluppo, saranno formati professionisti in grado di adattare al meglio tali innovazioni nei magazzini delle varie imprese e raggiungere così un grado di automazione dei magazzini per aumentare le performance dell'azienda e il benessere dei lavoratori all'interno di essa.

1 Tecnologie

Sono già state introdotte le tecnologie che in questa ricerca permettono anche una parziale automazione del magazzino delle imprese ed in questo capitolo saranno viste più nel dettaglio, cercando di spiegare meglio il loro utilizzo e i benefici che possono portare all'azienda interessata

1.1 AGV robot

Per Automated Guided Vehicle (AGV) si intendono tutti i sistemi automatizzati di stoccaggio e di prelievo degli ordini ed è particolarmente apprezzato da imprese di e-commerce, che gli utilizzano nei loro centri di distribuzione per gestire le forti fluttuazioni della domanda e grandi assortimenti di prodotti anche molto piccoli (T. Lamballais, D. Roy, M. B. M. De Koster, 2016). Ad esempio, Amazon attraverso gli AGV di Kiva robotics (acquisita successivamente e divenuta Amazon robotics) è riuscita ad automatizzare buona parte dei magazzini di dieci centri di distribuzione diversi, generando diversi benefici. Altri esempi, come quello di Staples, suggeriscono che i tassi di prelievo possono raddoppiare rispetto ai sistemi tradizionali picker-to-parts (Wulfraat, 2012). La difficoltà nell'implementare tale tecnologia è la necessità di investimenti multimilionari e l'implementazione nel layout di magazzino. Pertanto, la comprensione di come il tempo di ciclo degli ordini e l'utilizzo dei robot siano influenzati dal layout del magazzino e dalle politiche operative è importante per la pratica. Uno dei principali vantaggi di un AGV robot è che la velocità di prelievo può raggiungere tra le 200 e le 300 linee di lavoro per picker all'ora (Wulfraat, 2012; Wurman, D'Andrea, & Mountz, 2008). Il processo di picking funziona come segue: un ordine arriva e attende di essere assegnato a una delle postazioni di lavoro dove gli ordini vengono prelevati. Una volta che l'ordine è stato assegnato a una postazione di lavoro, gli AGV possono prelevare i prodotti. I prodotti sono generalmente immagazzinati scaffali mobili. Un robot si muove sotto uno scaffale chiamato pod, lo solleva e lo porta a una stazione di lavoro, utilizzando i corridoi e i corridoi trasversali. Il robot entra nel buffer della stazione di lavoro e si mette in coda per il suo

turno. Ogni stazione di lavoro dispone di un picker e, una volta che quest'ultimo ha prelevato i prodotti richiesti dallo scaffale, il robot trasporta il pod in un luogo di stoccaggio e lo deposita. Poiché si muove senza carico, non ha bisogno di utilizzare i corridoi, ma può muoversi sotto gli scaffali. Una volta raccolti tutti i prodotti necessari per un ordine, quest'ultimo esce dal sistema e un altro ordine può essere assegnato alla stazione di lavoro.

È interessante comprendere come un AGV robot riesce a muoversi in autonomia all'interno del magazzino. Esistono infatti vari modi per permettere il movimento ai robot: movimento a filo, banda magnetica, guida odometrica, triangolazione laser. Nel primo caso, il robot riesce a muoversi grazie al segnale elettrico di un filo posto al di sotto del pavimento. È un processo oneroso data la richiesta di implementazione del filo elettrico nel pavimento. La guida con i magneti è molto simile alla guida a filo ed è meno onerosa in quanto servono solo piccoli buchi per l'inserimento dei magneti. La guida odometrica invece sfrutta dei paletti catarifrangenti per guidare i robot che, attraverso un raggio laser, comprendono quale sia il percorso da seguire. In ultimo abbiamo la triangolazione laser che sfrutta anche in questo caso segnali catarifrangenti posti però sulle pareti, sfruttando la testa del robot che gira a 360° per captare il segnale con il laser.

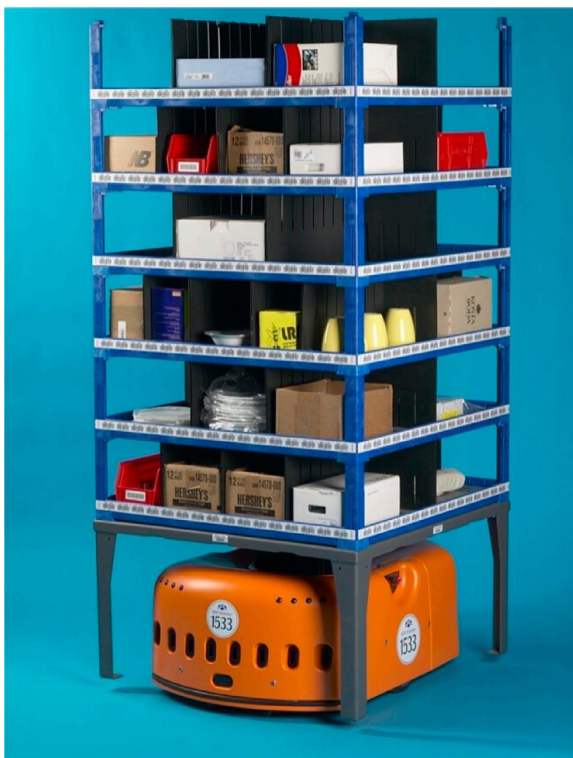


Fig. 1 – un robot AGV trasporta uno scaffale mobile

Per valutare le performance degli AGV vengono utilizzate tre metriche: throughput dell'ordine, tempo medio del ciclo ordine, utilizzazione robot. Il primo è il numero di ordini che lasciano il sistema, il secondo indicatore è il tempo medio impiegato dal robot per arrivare all'ordine partendo dal magazzino, l'ultimo è la percentuale di tempo in cui un robot è assegnato all'ordine (fra tutti gli altri robot). In un primo momento sarà valutato solo il network a singola linea ed in seguito sarà fatta un'estensione a questa aggiungendo anche le zone di storage per poi passare ad un ambiente per gli ordini multilinea. Ci sono quindi quattro situazioni differenti:

- Modello M_1 : singola linea senza zona di storage
- Modello M_2 : singola linea con zona di storage
- Modello M_3 : multilinea senza zona di storage
- Modello M_4 : multilinea con zona di storage

Prima di passare alla descrizione dei modelli è necessario fare due assunzioni: nei corridoi si viaggia in un unico senso di marcia e il robot viene assegnato ad una sola workstation.

Nel modello M_1 il robot parte dalla workstation con il pod su di esso (o in generale con i prodotti da immagazzinare) per andare ad immagazzinarlo nella zona apposita (movimento 1). Successivamente viene indirizzato ad un'altra zona di carico per prendere il successivo materiale da ritirare (movimento 2), lo ritira e torna alla workstation assegnata (movimento 3). Una volta scaricato il materiale necessario, la linea ordine viene tolta dal sistema. Il robot, quindi, consegna lo scaffale nella zona di storage, lo scarica e resta sotto il pod scaricato in attesa di nuove istruzioni per una nuova linea ordine. Quando il sistema sincronizza una nuova linea ordine per il robot, esso riprenderà dal ritiro di un nuovo pod. Dopo la sincronizzazione, gli Infinite Server (IS) modellano il tempo necessario che l'AVG impiegherà per i movimenti 2 e 3.

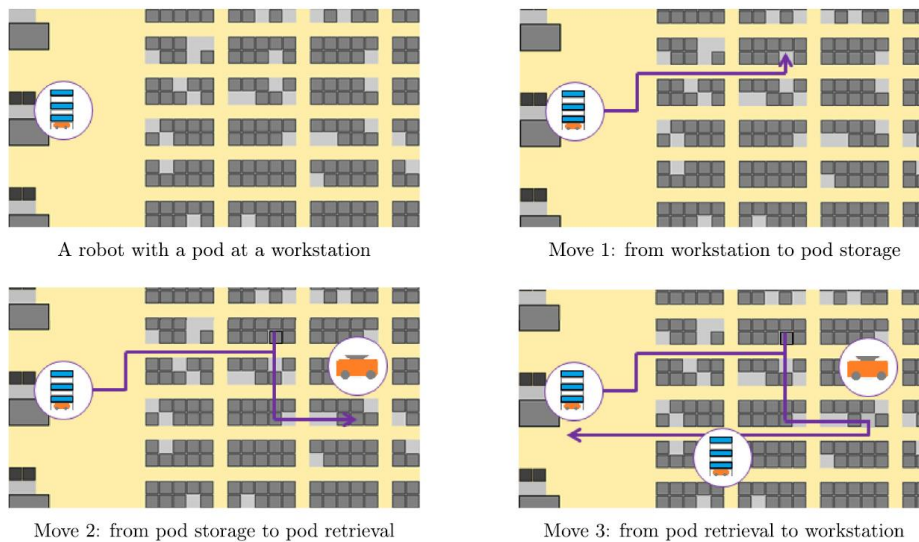


Fig. 2 – Modello M_1

Solitamente i prodotti maggiormente utilizzati dai lavoratori delle workstation sono immagazzinati vicino ad esse per ridurre il tempo di viaggio degli AGV. Nel modello M_2 con le storage zone l'obiettivo è proprio questo: in un sistema con storage zone vengono create delle aree del magazzino dove vengono immagazzinati i prodotti in base alla loro frequenza di utilizzo. I robot però sono assegnati ad una workstation e non ad una storage zone dato che hanno la possibilità di andare in tutte le zone; quindi, in ogni storage zone possono lavorare più robot in contemporanea. Il modello in questione contiene un totale zone Z , questo significa che Z zone modellano il movimento 1 (una stazione per ogni zona), il movimento 3 è simile al primo in quanto usa Z zone, il movimento 2 invece utilizza $Z \times Z$ zone dato che dopo aver immagazzinato il pod in una zona Z può passare in qualsiasi altra zona Z per ritirare il successivo scaffale. Il problema di routing è basato sulle probabilità p_z che il robot AGV si trovi in quella zona Z . Per esempio, se consideriamo il movimento 2 dove il robot immagazzina il pod nella zona 1 e deve ritirare quello successivo nella zona Z , la probabilità dello scenario è data da $p_1 \times p_z$, perché la probabilità che lo scaffale vada nella zona 1 è p_z e la probabilità che il robot debba andare nella zona Z a ritirare è p_z .

Nel modello M_3 può invece capitare che un ordine non abbia bisogno solo di un pod portato da un robot alla workstation ma necessita di un altro scaffale,

quindi di un ulteriore viaggio dello stesso robot per essere completato. Qui, nel movimento 1. I modelli 3 e 4 estendono i primi due nel caso in cui si assista ad una situazione di ordini multilinea. Qui, si assume che il numero di linee per ordine assuma una distribuzione geometrica con parametro p , quindi il numero medio per di linee ordine è $\frac{1}{p}$. Durante il movimento 1, il robot trasporta il pod in un luogo di stoccaggio e lo immagazzina. Con probabilità $1-p$, l'ordine che è stato assegnato al robot ha bisogno di più linee d'ordine e il robot va alla stazione IS, modellando la mossa 2. Con probabilità p , l'ordine che è stato assegnato al robot non ha bisogno di più linee d'ordine, l'ordine esce dal sistema e il robot va alla stazione di sincronizzazione in attesa di un nuovo ordine (T. Lamballais, D. Roy, M. B. M. De Koster, 2016).

Il modello M_4 è un'estensione del 2 ed è del tutto simile al modello M_3 appena descritto, con la differenza che sono presenti le aree di storage.

Per valutare il tempo di viaggio, è necessario conoscere le distanze di viaggio dei vari movimenti e dividerli per la velocità degli AGV robot. Si sommano quindi i tempi necessari dello stoccaggio nel movimento 1 e i tempi necessari di presa dello scaffale nel movimento 3. Il tempo di stoccaggio, il tempo di presa e la velocità del robot sono assunti come costanti e il robot non ha la possibilità di accelerare o decelerare. Il tempo di viaggio finale descrive il tempo di servizio degli Infinite Server stations per ogni modello (T. Lamballais, D. Roy, M. B. M. De Koster, 2016). Il tempo di carico è rettilineo e ogni corridoio ha solo una direzione di viaggio. La zona di entrata per il posto di storage del pod è il punto situato nel corridoio dove è presente lo spazio dove stoccare il pod. La zona di entrata della workstation è il punto all'interno del magazzino dove il robot entra nel buffer della workstation stessa. Il punto di inizio intersezione è un concetto più complicato. Ipotizziamo che il robot debba fare un viaggio in cui il punto di stoccaggio del pod è situato ad est e la workstation è situata ad ovest. Mentre il robot si muove per scaricare lo scaffale la distanza tra il robot e la sua destinazione finale aumenta. Il punto di inizio intersezione è quello in cui inizia a diminuire la distanza tra i due; quindi, subito dopo che l'AVG robot ha lasciato il pod nel suo spazio di stoccaggio. Questo punto è sempre tra l'intersezione dei corridoi. Più formalmente, nel viaggio più breve tra lo spazio di storage e la workstation, il punto di

intersezione è il primo punto con un arco uscente verso dove la workstation è situata. Il viaggio più breve può quindi essere diviso in quattro parti: la prima parte è fatta dalla distanza tra la posizione attuale dell'AGV robot e l'ingresso del posto di stoccaggio, la seconda è la distanza tra quest'ultimo e il punto di intersezione, la terza è dal punto di intersezione al buffer della workstation, la quarta è il delta necessario per far ripartire il robot dalla workstation alla zona di storage.

1.1 ASRS

Un ASRS, acronimo di Automated Storage and Retrieval Systems, è un sistema di magazzino che prevede l'immagazzinamento e il picking dei prodotti in maniera completamente automatizzata. Fin dalla loro introduzione nel 1950 circa sono stati largamente utilizzati in particolar modo dalle grandi catene di distribuzione (Kees Jan Roodbergen, Iris F.A. Vis, 2008). Questo sistema è solitamente costituito da scaffalature servite da carrelli che attraversano i corridoi tra le scaffalature stesse. Come detto in precedenza, un ASRS è in grado di gestire i pallet senza l'interferenza di un operatore, quindi il sistema è completamente automatizzato. Gli ASRS sono utilizzati in gran parte anche in ambienti di produzione per immagazzinare principalmente materie prime, semi lavorati e prodotti serviti per poterli recuperare in seguito, per soddisfare un ordine o per essere trasferiti nella work station e completare il lavoro (è il caso dei primi due prodotti). Il numero di ASRS utilizzati nella grande distribuzione negli Stati Uniti è cresciuto notevolmente tra il 1994 e 2004, questo come conferma del suo enorme potenziale applicativo e per i benefici che riesce a garantire negli spazi lavorativi (Automated Storage Retrieval Systems Production Section of the Material Handling Industry of America, 2005). Sono molti i benefici generati da questo sistema, in particolar modo è possibile osservare una riduzione del costo del lavoro e dello spazio necessario, un aumento dell'affidabilità e una diminuzione degli errori. Possono però presentarsi anche alcuni svantaggi, come ad esempio l'alto costo dell'investimento (approssimativamente \$634,000 per ASRS con singolo corridoio, Zollinger, 1999), una riduzione della flessibilità e anche un alto costo

degli investimenti in sistemi di monitoraggio e controllo del sistema ASRS (circa \$103,000, Zollinger, 1999). Inoltre, è necessario studiare bene il design e lo spazio disponibile prima dell'implementazione del sistema per catturare tutti i vantaggi che questo porta con sé.

Esistono sul mercato numerosi tipi di ASRS ma generalmente sono costituiti da scaffalature o racks, gru o carrelli, corridoi, punti di I/O e posizioni di prelievo. I rack sono tipicamente strutture metalliche in cui possono essere ospitati carichi (ad esempio, pallet) che devono essere immagazzinati. Le gru sono le macchine di stoccaggio e prelievo completamente automatizzate che possono spostare, prelevare e scaricare autonomamente il prodotto. I corridoi sono invece costituiti dagli spazi vuoti tra le scaffalature, in cui le gru possono muoversi. I punti di input/output (I/O) sono quelli dove il prodotto viene prelevato o scaricato dalla gru. In ultimo, possono esistere le postazioni di picking dove un operatore manualmente preleva e modifica i carichi per completare un ordine prima di consegnarlo al carrello che lo porterà nuovamente nella sua postazione.

Come detto prima, esistono vari tipi di ASRS, principalmente differenziati dal numero di corridoi che hanno. Nel caso di ASRS con più di un corridoio, non è detto che in ognuno di essi lavori un carrello o una gru, infatti esistono ASRS multi-shuttle in cui un carrello può lavorare su più corridoi, trasportando contemporaneamente più carichi su di esso.

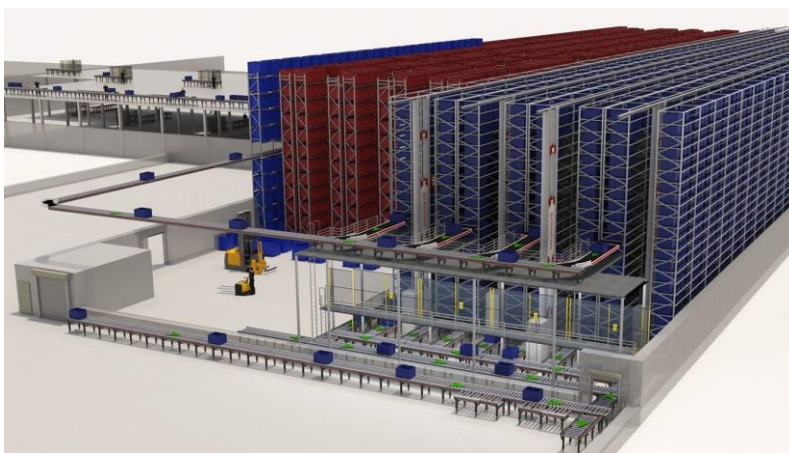


Fig. 3 – un sistema ASRS

Un punto essenziale riguarda la corretta decisione del design di un ASRS, dato che il suo layout è fisso ed è conveniente modellare il suo design una sola volta, con l'obiettivo di evitare colli di bottiglia e sovracapacità causate da un aumento della futura domanda. In primis, bisogna far notare che un ASRS non è l'unico sistema esistente in un magazzino, ma coesiste con numerosi altri sistemi. Ad esempio, nel punto di input-output I/O nella maggior parte dei casi troviamo collegato un sistema di convogliatori e smistatori o un set di veicoli che permettono la connessione tra il punto iniziale di un ASRS e il resto del magazzino. I ritardi derivanti anche solo da un sistema si ripercuotono poi anche a tutti gli altri. Quindi, per scegliere il design adeguato a un ASRS (numero di punti I/O, capacità dei punti di buffer ecc.) dobbiamo vedere il sistema complessivo e non solamente quello del nostro magazzino automatico. Inoltre, è necessario analizzare il nostro ambiente di lavoro e il settore industriale di riferimento. Per esempio, in un ambiente manifatturiero il bisogno primario potrebbe essere quello di fornire i materiali richiesti in tempo per non far bloccare la produzione, nell'ambito della distribuzione è necessario avere un tempo di presa e di scarico accettabili per evadere l'ordine verso il cliente con facilità e in tempo. In parte, la scelta adeguata del design di un ASRS è dettata dalle sue caratteristiche fisiche. Quindi per primo bisogna scegliere il tipo di ASRS da andare ad utilizzare (scelta del sistema). Poi, bisogna capire il numero di corridoi e di scaffali da implementare (configurazione del sistema). Queste scelte generalmente sono fatte sfruttando serie storiche e previsioni, budget, caratteristiche del prodotto, throughput previsto, spazio del magazzino disponibile e richiesto. Una visione elaborata della scelta di un ASRS in base ai metodi di selezione è stata trovata da Allen (1992). Per un tipico problema di design del magazzino automatico, la capacità totale del sistema è data dall'inizio. Questo significa che il prodotto tra il numero di corridoi, altezza degli scaffali e la lunghezza degli scaffali è costante (Kees Jan Roodbergen, Iris F.A. Vis, 2008). Aumentare il numero di corridoi implica una riduzione della lunghezza degli scaffali o la loro altezza per mantenere la stessa capacità di stoccaggio. A causa di questa relazione, avere più corridoi indirettamente diminuisce il tempo di risposta dovuto ad una diminuzione di lunghezza o altezza degli scaffali. In un ASRS standard dove di ha un crane per ogni corridoio, un

aumento di questi ultimi implica anche un aumento del numero di crane, con un aumento indiretto del throughput e dell'investimento. Anche fissando inizialmente il numero di corridoi da utilizzare sussiste un trade off tra l'altezza e la lunghezza degli scaffali. Dato che le gru possono muoversi verticalmente e orizzontalmente in maniera simultanea, il tempo di viaggio totale è dato dal massimo del tempo di viaggio verticale e orizzontale (distanza metrica di Chebyshev). Tipicamente la velocità di traslazione orizzontale è di 3 m² rispetto alla velocità di traslazione verticale pari a 0,75 m² (Tompkins et al., 2003). Un buon bilanciamento tra l'altezza e la lunghezza degli scaffali può aiutare a diminuire il tempo di spostamento. Una comune teoria, non necessariamente ottimale, per dimensionare gli scaffali viene chiamato square-in-time in cui il tempo necessario al crano per raggiungere la riga più alta dell'ASRS deve essere uguale al tempo impiegato per raggiungere l'ultima colonna. Un rack o scaffale che non è square-in-time viene chiamato rettangolare. Inoltre, per gestire meglio la domanda dei clienti che può essere molto variabile, può essere utile all'interno di ogni scaffale avere più spazi di storage con dimensioni diverse per adattarsi meglio ai differenti carichi. Parlando dei punti di I/O, può essere utile averne più di uno per ogni corridoio, magari inserendolo nel mezzo o nella parte posteriore del corridoio per aumentare il flusso di merci che circolano in entrata e in uscita.

Importante come la scelta del design è anche la scelta del software di controllo necessario alle operazioni del magazzino ASRS (Fohn et al., 1994; Terry et al., 1988). Delle buone procedure di design possono essere quelle che simultaneamente si preoccupano sia del layout del sistema che del meccanismo di controllo di tutto l'ASRS. Anche in questo caso è necessario vedere nel complesso tutto il sistema del magazzino, verificando che il software dell'ASRS collabori ottimamente con tutti gli altri del sistema.

Le policy di controllo sono metodi per determinare le azioni che il sistema ASRS deve eseguire. Esistono vari meccanismi di controllo come: le storage assignment policies che servono come meccanismo di assegnazione dello spazio in cui stoccare il prodotto, dwell-point policy che determina il punto in cui un crano inattivo aspetta, regole di sequenziamento, regole di batching.

Per quanto concerne le storage assignment policies, esistono attualmente cinque regole più utilizzate per l'assegnazione dello spazio di storage

(Hausman et al., 1976 or Graves et al., 1977) che sono:

- Assegnamento dedicato
- Assegnamento casuale
- Assegnamento nello spazio aperto più vicino
- Assegnamento full-turnover-based
- Assegnamento class-based

Per l'assegnamento dedicato ogni prodotto è assegnato ad una locazione fissa e lo stesso prodotto viene immagazzinato sempre nello stesso spazio. Lo svantaggio che si porta dietro questo metodo è il basso grado di utilizzo degli spazi e un elevato spazio totale richiesto dato che lo spazio non può essere occupato anche se il prodotto in quel momento non è presente nello spazio storage. Il vantaggio principale è invece dato dal fatto che nei piani più bassi possono essere immagazzinati i prodotti più pesanti. Nel secondo metodo di immagazzinamento, quello casuale, ogni spazio vuoto di storage ha la stessa probabilità di essere usato come posto disponibile per i prodotti in ingresso. Se l'ASRS si avvale della terza regola di assegnazione il prodotto è stoccato nello spazio più vicino che il crane incontra. Nella regola full-turnover-based il prodotto è immagazzinato in base alla frequenza di domanda che esso ha: i prodotti maggiormente richiesti devono essere più facilmente e velocemente reperibili all'interno dell'ASRS, tipicamente vicini ai punti di I/O. Heskett (1963,1964) ha presentato una regola molto simile a questa chiamata regola cube-per-order (COI). Il COI viene definito come il grado di spazio richiesto dal prodotto per il numero di richieste per quel prodotto in un determinato periodo. Un COI basso è assegnato ai prodotti da posizionare vicino ai punti di I/O. Per ridurre lo spazio richiesto e poter periodicamente riassegnare i posti di storage mantenendo un'elevata efficienza viene utilizzata la regola di assegnazione class-based. Questo metodo divide lo spazio disponibile dell'ASRS in più aree in cui ogni prodotto viene assegnato, basato sulla frequenza della domanda. All'interno dell'area viene però utilizzata la regola dell'assegnazione casuale. Possiamo quindi definire questa regola come un'ibrida fra più regole di assegnazione. Questa regola porta il vantaggio di aumentare l'efficienza

grazie al fatto che i prodotti più utilizzati sono assegnati in punti a quelli di I/O e allo stesso tempo mantiene un'alta flessibilità grazie alla regola di assegnazione casuale.

Passando ora ai dwell—point policy, come detto in precedenza sono meccanismi di decisione per stabilire dove far stazione una gru inattiva. Esistono attualmente vari metodi, come le quattro regole statiche introdotte da Bozer e White (1984). Successivamente nel 1991 Park mostra un algoritmo ottimale per i dwell-point in cui la probabilità, che sarebbe la prima richiesta che riceve il crane dopo un periodo di inattività (storage request), è pari a 0,5. Nello stesso anno Egbelu propose un modello lineare di programma in grado di gestire la fluttuazione della richiesta. Una simulazione migliore venne fatta da Egbelu e Wu nel 1993 utilizzando le quattro regole di Bozer e White e le regole dinamiche di Egbelu. Sintetizzando, sono state utilizzate molte regole, dalla semplice regola del pollice, espressioni analitiche e approcci con programmazione matematica ma non è stato possibile individuare una regola ottimale.

Le regole di sequenziamento e di storage non ricoprono un ruolo prioritario per il sistema. Tuttavia, le richieste di storage solitamente sono in accordo con la regola first-come-first-served, in cui viene processato il primo prodotto inserito nel sistema, sia nella presa sia nello stoccaggio. Han et al. (1987) suggerì due modi per risolvere questo problema. Nel primo, si seleziona un blocco di richieste più urgenti per lo storage e il ritiro, li sequenzia e quando sono completi passa al blocco successivo (processo di block sequencing). Nel secondo, possiamo sequenziare l'intera lista delle richieste ogni volta che si riceve una richiesta di sequenziamento e gestire il tutto con le due date o le priorità. L'obiettivo è quello di minimizzare i tempi di transito e le distanze.

Supponiamo che per un unico ordine o per più ordini si ha bisogno di più prodotti. Possiamo quindi scegliere se prelevare un prodotto alla volta dall'ASRS o se possiamo prenderli insieme. Questo è chiamato problema del batching e ci sono regole per stabilire come gestire gli ordini. Il beneficio portato dal batching è che si minimizzano i tempi di trasporto dato che per evadere un ordine completo prelevando un prodotto alla volta richiederebbe molto tempo. La capacità del crane è un punto fondamentale in questo caso perché stabilisce quanti prodotti è in grado di portare con un solo viaggio. Si

rende necessario stabilire quanto grande deve essere il batch. Molti metodi euristici di batching seguono tipicamente tre step: un meccanismo di selezione chiamato seed, un metodo per allocare gli ordini al batch, un metodo per stoppare il processo quando il batch è completo.

1.2 Convogliatori e sistemi di smistamento automatici

Parlando dei convogliatori e dei sistemi di smistamento, si sta assistendo ad un maggior utilizzo anche in questo caso di robot in grado di dare la giusta direzione ai prodotti che devono andare o in una work station oppure essere consegnati per il packaging, per poter essere successivamente essere inseriti nell'ordine finale. Generalmente i sistemi di smistamento automatici con robot utilizzano due differenti layout: nel primo sono presenti dei robot che si muovono sul livello superiore e smistano i pacchi in base alla destinazione su trasportatori a spirale collegati direttamente ai container nel livello inferiore per procedere alla spedizione, nel secondo caso invece i robot sono tutti sullo stesso livello e si muovono sul perimetro del convogliatore per gestire la direzione del prodotto in ingresso e in uscita dal perimetro (Bipan Zou, Renè De Koster, Yeming Gong, Xianhao Xu, Guwen Shen, 2021).

Questo sistema automatizzato porta molti vantaggi rispetto ai metodi di smistamento tradizionali, in particolare si assiste ad un aumento della flessibilità dato che il sistema è interamente gestito dal software, la capacità del sistema è facilmente modificabile rimuovendo o aggiungendo robot smistatori, il sistema necessita meno spazio favorendo quindi l'ottimizzazione degli spazi. Ci sono però anche diversi svantaggi portati dal fatto che questo sistema di convogliamento e smistamento richiede ingenti investimenti (come nel caso degli ASRS) e la gestione del software non è così banale, creando in alcuni casi tanta congestione in linea nei periodi di picco della domanda.

Inoltre, un Automated sorting system (ASS) possiede quattro principali caratteristiche che permettono all'impresa di ottenere molti benefici:

- È molto veloce: l'obiettivo di spedizioni next-day e same-day sembra

essere molto presente in molti venditori online (Yaman, Karasan, & Kara, 2012) e servizi postali (Werners & Wülfing, 2010)

- Gestisce una grande quantità di spedizioni: volendo fornire un esempio, l'hub aeroportuale di Colonia (Germania), che è uno dei tre principali hub di UPS per le spedizioni, ha una capacità di sorting superiore alle 190.000 spedizioni all'ora (Airportzentrale, 2014)
- È affidabile: Il dipartimento di trasporto degli Stati Uniti (2009) riporta un range tra 1,42 e 9,17 di bagagli smarriti ogni 1.000 passeggeri per 19 aeroporti. Questo porta ovviamente ad un calo della soddisfazione del cliente. Un sistema ASS, quindi, può portare a notevoli benefici in questo caso
- Può trasportare prodotti pesanti e ingombranti: L'invecchiamento della società in molti paesi industrializzati suggerisce di automatizzare le attività che causano un elevato stress ergonomico per i lavoratori umani (Otto, Boysen, Scholl, & Walter, 2017). Il trasporto ripetuto di oggetti pesanti e ingombranti rientra tra queste attività

Un sistema di sorting e convogliatori automatici ha un layout di base molto semplice: c'è una o più stazioni di input per la ricezione delle merci, un sistema di convogliatori con nastri alla fine dei quali sono presenti delle stazioni di uscita per indirizzare il prodotto nella parte di magazzino prestabilita. Nel layout più semplice ad una stazione di input, i prodotti hanno ovviamente tutti lo stesso ingresso. Un nastro convogliatori li porta quindi al sistema di riconoscimento dove vengono pesati e identificati, ad esempio scansionando un codice a barre attaccato sul prodotto stesso (Abdelghany, Abdelghany, & Narasimhan, 2006), identificando un indirizzo scritto a mano con un particolare software di riconoscimento dei caratteri ottici (OCR) (Fedtke & Boysen, 2017b) o ricevendo informazioni attraverso un chip RFID (Ilie-Zudor, Kemény, Van Blommestein, Monostori, & Van Der Meulen, 2011). Dopo di questo, un sistema di switch porta il prodotto sul nastro di trasportatore principale, assicurando una corretta distanza tra un prodotto e l'altro. I sistemi ASS più complessi hanno più stazioni di input che funzionano allo stesso modo ma evitano colli di bottiglia ed aumentano la capacità del sistema. Il convogliatore principale si muove linearmente su un percorso fisso

mentre passa le stazioni di uscita. La velocità tipica di un convogliatore è di 2,5 metri al secondo (Fedtke & Boysen, 2017b). Nella figura in basso vengono presentati i tipici sistemi di reindirizzamento dei prodotti verso le stazioni di uscita. Una soluzione molto diffusa sono i trasportatori a vassoio inclinabile, ciascuno dei quali deve essere caricato con un singolo prodotto. Ogni vassoio è inclinabile su uno o entrambi i lati, in modo che un prodotto possa scivolare nella sua stazione di uscita dedicata. Altre soluzioni sono i sorter a baia, in cui la parte sottostante del nastro trasportatore viene aperta e la spedizione cade nella postazione prestabilita, e i sorter a incrocio, in cui ci sono vari segmenti che operano ad angolo retto rispetto alla direzione del trasportatore principale. Infine, c'è la soluzione chiamata sliding shoes ("scarpe scorrevoli").

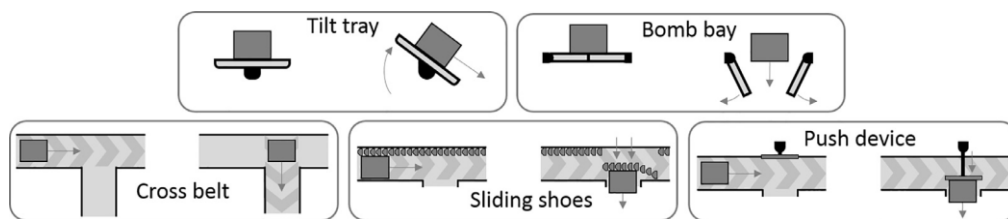


Fig.3 – sistemi di smistamento su nastro trasportatore

Tuttavia, un problema può essere rappresentato dai prodotti scansionati ma che non sono ancora stati assegnati a nessuna stazione di uscita o che non sono stati scansionati adeguatamente. In questo caso, il nastro trasportatore porta questi prodotti a fine corsa e successivamente un operatore gli riporta manualmente alla stazione di ingresso per ripetere il procedimento. Questa operazione può essere evitata adottando un sistema di nastri convogliatori in loop, in cui il nastro è circolare e il prodotto resta su di esso fin quando non viene trovata la giusta stazione di uscita (Fig.4). Per quanto riguarda invece le stazioni di uscita, esse devono possedere una sorta di buffer per far sì che i prodotti possano sostare lì fin quando non c'è il bisogno di essere prelevati per lo stoccaggio o il completamento di un ordine.

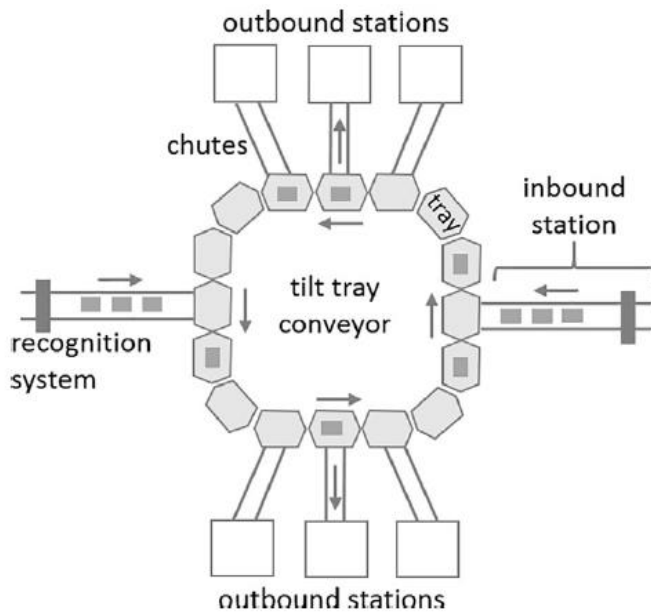


Fig.4 – sistema di nastro trasportatore in loop

Gli automated sorting systems sono utilizzati largamente nei magazzini anche grazie al ruolo cruciale nei batching o politiche di suddivisione dello spazio del magazzino (De Koster, Le-Duc, & Roodbergen, 2007). Questo significa che più prodotti sono selezionati dagli scaffali del magazzino e uniti in un unico ordine per mandarlo al cliente così com'è stato richiesto. Per la suddivisione delle zone del magazzino, quest'ultimo è appunto diviso in diverse aree dove verrà inserita una stazione di uscita dal sistema ASS per facilitare gli spostamenti lungo la pianta.

Implementando il sistema ASS in un magazzino permette di ottenere un picking più efficiente sia quando il prodotto deve essere stoccato in magazzino sia per recuperarlo da questo e mandarlo nella zona spedizione. Alcuni magazzini installano un ulteriore sistema ASS all'interno della zona di spedizione per smistare i prodotti in maniera più efficiente ai mezzi di trasporto. In questa applicazione la stazione di uscita è tipicamente un convogliatore telescopico in grado di allungarsi e raggiungere direttamente l'interno del mezzo del trasporto (Boysen et al., 2017b).

Un tipico problema all'interno del magazzino dotato di un sistema automatico di smistamento a singola stazione di ingresso è quando ci sono tante merci da inserire nella linea e questa è occupata. Si viene quindi a creare quindi una congestione, chiamata anche gridlock (stallo), in cui sono necessari costosi e

laboriose procedure di ripristino nella parte logistica (Gallien & Weber, 2010). Questo può essere evitato se viene applicato un approccio Wave-picking in cui vengono gestiti i batch degli ordini. Gallien e Weber (2010) sviluppano un modello per un magazzino automatizzato di un importante rivenditore online statunitense, che considera diverse politiche per il rilascio di ondate di articoli impacchettati nel sistema di trasporto principale al fine di accumulare gli ordini dei clienti. Infatti, qui un batch può essere inserito nella linea solamente quando il batch precedente è rilasciato nel convogliatore principale, lasciando libera la stazione di ingresso. Inoltre, studiarono un possibile miglioramento per rilasciare nella linea un batch anche se quello precedente è ancora in fase di rilascio. A tal fine, svilupparono un meccanismo predittivo per controllare la congestione della linea e decidere di volta in volta se inserire il prossimo batch o meno.

Un problema simile sussiste quando si parla delle stazioni di uscita e dei buffer che bisogna realizzare al di fuori di essi. Bozer et al. (1988) svilupparono un modello di simulazione SLAM per valutare quattro tipi differenti dei cosiddetti Wave profile su un sistema di smistamento automatico. Si considera il layout più semplice con singola stazione di ingresso, trasportatore e varie stazioni di accumulo o buffer. I profili d'onda (wave profiles) individuano il numero di ordini dei clienti accumulati. Per i quattro profili d'onda sono assegnati quattro diverse logiche di smistamento. La logica più intuitiva è quella accidentale in cui un ordine è assegnato ad una stazione di accumulo vuota ogni qual volta che la prima resta in circolo nel sistema, occupando la linea. Uno dei problemi generati da questa simulazione è che l'ordine potrebbe restare in loop nel sistema se non passa sulla corsia giusta al momento giusto dato che poi la stazione di accumulo potrebbe essere occupata da successivi ordini (il sistema la vede vuota). Uno studio di simulazione ha dimostrato che i vantaggi della strategia di assegnazione accidentale diminuiscono se il numero di corsie di accumulo è uguale o superiore al numero medio di ordini per onda.

1.3 Autostore

All'interno dell'Autostore i prodotti sono immagazzinati in contenitori disposti

uno sopra l'altro che vanno a formare una griglia di righe e colonne (Michaela Beckschafer, Simon Malberg, Kevin Tierney, and Christoph Weskamp). I contenitori sono omogenei ma possono essere immagazzinati, all'interno di questi, prodotti differenti tra loro. In alto alla griglia sono posizionati i robot in grado di sollevare e trasportare i prodotti da immagazzinare o da mandare nella work station dove ci sarà un lavoratore in grado di completare l'ordine o il prodotto. Se il prodotto è in alto alla griglia allora il robot si occuperà in autonomia della presa dello stesso, altrimenti all'interno della griglia è possibile trovare dei robot smistatori in grado di sollevare i contenitori, selezionare quello richiesto dall'operatore e mandarlo al robot trasportatore. Questo porta a un processo di picking più efficiente perché in un sistema di picking manuale il tempo di viaggio è pari a circa il 50% dell'intero tempo di prelievo (Michaela Beckschafer, Simon Malberg, Kevin Tierney, and Christoph Weskamp). Il tempo di accesso per uno o più prodotti nei sistemi di stoccaggio manuali è molto elevato dato che gli addetti al picking devono attraversare il magazzino per raccogliere i prodotti e poi tornare alle loro postazioni di lavoro. Nei sistemi Autostore, il contenitore con il prodotto richiesto potrebbe trovarsi nel livello inferiore della griglia e potrebbe comportare tempi di accesso molto lunghi. Tuttavia, la produttività per la maggior parte dei prodotti è più elevata perché diversi robot possono lavorare simultaneamente e grazie ai sorting robot e ai robot trasportatori il problema non sussiste. È necessario però organizzare adeguatamente i percorsi (attraverso il software) dei robot che si muovono sulla griglia dato che, come detto, lavorano simultaneamente e si deve, ad ogni costo, evitare di farli sovrapporre, con il rischio creare un ingorgo.

Inoltre, questo sistema è particolarmente apprezzato per la sua flessibilità dato che è modulabile e possono quindi essere aggiunte o tolte postazioni sia per i robot trasportatori sia per i contenitori all'interno della griglia. Per di più questo sistema è efficiente dal punto di vista dello spazio e consente di risparmiare sui costi. I corridoi, infatti, non sono necessari e il sistema utilizza il 40-60% di spazio in meno rispetto ai sistemi convenzionali.

Dal punto di vista del design, è molto simile ad un sistema ASRS ma molto più compatto. Infatti, in quest'ultimo caso sono presenti corridoi (come discusso in precedenza) mentre l'Autostore è in grado di lavorare senza di essi.

In Fig.5 è presente l'immagine di un tipico Autostore, prodotto da Swisslog, in cui si vedono chiaramente i robot trasportatori al di sopra della griglia.



Fig. 5 – Autostore prodotto da Swisslog

I modelli di Autostore possono essere modellati in vari modi. Utilizzando ad esempio modelli matematici è possibile identificare un modello ottimale per il sistema, sebbene la moltitudine di strategie di routing e di stoccaggio possano essere un grosso problema per i sistemi di Autostore più piccoli. Inoltre, viene creata una simulazione discreta di eventi (DES) che aiuta a modellare i meccanismi di coda, che richiederebbero notevoli assunzioni di semplificazioni in assenza della simulazione. La DES viene quindi utilizzata come un'appropriata tecnica di modellazione per simulare ed analizzare un sistema Autostore a griglia, con l'obiettivo di scoprire le migliori policy di stoccaggio e trovare il grado di utilizzo totale del sistema. Un DES è composto da uno stato di sistema, un orologio di simulazione, una lista di eventi e delle condizioni per stabilire quando terminare il processo. I cambi di stato del sistema vengono registrati dall'orologio di simulazione. Nel caso specifico, lo stato del sistema rappresenta: gli ordini o i prodotti rimanenti, la posizione di ogni contenitore nel sistema, il tipo e la quantità di prodotti immagazzinata in ogni contenitore, lo spazio disponibile nel buffer o nella postazione di lavoro per quanto riguarda le stazioni rispettivamente

di ingresso e di uscita, la posizione di ogni robot addetto alla presa e allo stoccaggio, e quale contenitore (nel caso) viene trasportato in quel momento. Se si dovesse simulare un solo trasporto, non sorge la preoccupazione dello stato della batteria dei robot che si assume parte carica fin dall'inizio. La lista degli eventi riporta invece l'entità e l'evento specifico, ad esempio la stazione richiede un contenitore, il sistema seleziona il contenitore, lo processa, lo immagazzina nuovamente ecc.

Un algoritmo tipico è quello di controllare se le stazioni di ingresso o di uscita sono occupate con un ordine. Se queste non sono impegnate, il sistema porta dietro un ordine dalla coda degli ordini e inizia a processarlo (comando Request-Bin). Se il contenitore si trova nella parte alta della griglia, il sistema fa partire il comando Sort-To-Top e il primo robot disponibile viene incaricato di andarlo a prendere. Quindi, una volta in posizione, parte il comando Transport-Bin e si attende il robot che andrà a trasportare il contenitore. Di seguito, partono i comandi Take-Bin, Move, e Release-Bin e quindi viene rilasciato alla stazione di uscita dove un lavoratore si occuperà di completare l'ordine.

Per quanto riguarda i sorting robot o i robot trasportatori, essi si muovono simultaneamente all'interno della griglia ed è quindi essenziale che il software si preoccupi di pianificare il percorso di ognuno di essi e di non farli scontrare tra loro per non creare ingorghi, considerando che questi possono muoversi verticalmente e orizzontalmente ma non diagonalmente. Quindi, ogni robot ha installato su di esso un software per poter studiare la posizione e il percorso degli altri per avere in tempo reale la possibilità di pianificare il proprio percorso, infatti una volta che il robot decide la strada da prendere, il percorso viene occupato e tutti gli altri robot non possono trovarsi nello stesso momento in quella posizione.

Per la storage policy si utilizza solitamente la strategia del posto disponibile più vicino, utilizzando allo scopo la distanza metrica pesata di Manhattan:

$$\text{Distanza } (x,y,z,x',y') := (x-x') + (y-y') + az;$$

dove x e y indicano la posizione del contenitore da ritirare, z il numero di contenitori al di sopra del contenitore da ritirare, x' e y' la posizione della stazione e (a) è un fattore di penalità per il fatto che il robot selezionatore deve andare a prenderlo in basso (varia in base all'altezza).

1.4 Droni automatici da trasporto

Negli ultimi anni molte imprese subiscono il poco spazio presente nel proprio magazzino, con le difficoltà connesse a questo problema come perdite di tempo, scarsa ottimizzazione del percorso, errore umano. Per venire incontro a queste necessità vengono in aiuto i droni automatici da trasporto in grado di non occupare lo spazio di lavoro dato che possono muoversi in aria, trasportando oggetti da ogni parte del magazzino.

Nel magazzino viene utilizzato un sistema a doppia scaffalatura. Tra le doppie mensole, c'è un ampio corridoio in cui può viaggiare il drone. Uno scaffale è diviso in file o scomparti (celle). All'interno di un compartimento possono essere create una, due o tre posizioni. Ogni unità immagazzinata in queste posizioni è identificata con un codice QR che contiene tutti i dati rilevanti. Percorrendo il corridoio, il drone cerca i codici QR posti sui cartoni esterni e non appena la fotocamera del drone ne trova uno, viene scattata una foto che viene inviata a un dispositivo di elaborazione. Secondo il modello proposto, il drone conosce la sua posizione esatta nel magazzino, e procede quindi alla presa del prodotto (László Radácsi, Miklós Gubán, László Szabó and József Udvaros, 2022). I droni sono generalmente classificati in base alle loro caratteristiche prestazionali, come peso, carico alare, portata, altitudine massima, velocità, resistenza, tipi di motore e costi di produzione, con questi importanti parametri di progettazione che distinguono diversi tipi di droni e forniscono sistemi di classificazione vantaggiosi (Ivan Derpich, Daniela Miranda, Juan Sepuvela, 2018). È stimato che l'utilizzo dei droni diminuisce

notevolmente il tempo di trasporto all'interno della pianta del magazzino e si passa dall'utilizzo medio di otto operatori incaricati al trasporto manuale a poche unità di droni.

Lo svantaggio portato da questa tecnologia è dato, oltre che dall'investimento iniziale, dall'autonomia che questi droni posseggono. Bisogna quindi studiare bene il percorso da effettuare per non incorrere in problemi generati dallo spegnimento di questi.

Quando però una società viene dotata di più droni per il trasporto delle merci, sorge il problema della gestione e della pianificazione delle rotte che questi droni dovranno seguire. A questo scopo, alcuni studi hanno ipotizzato l'uso di una Swarm Intelligence per evitare la collisione tra i droni usando il metodo della velocity-matching. Venne anche utilizzato da alcuni studi l'algoritmo della formica per pianificare il percorso ma è risultato poco funzionale per il caso in questione. Un modello che sembrerebbe funzionare qui si basa su un modello polinomiale, una soluzione dove solo i movimenti discontinui lineari hanno il bisogno di una simulazione (László Radácsi, Miklós Gubán, László Szabó and József Udvaros, 2022).

Ci sono inoltre molti studi per quanto riguarda il controllo dell'inventario. In uno studio, F. Benes et al. descrivono che, nel caso di grandi magazzini all'aperto, i metodi di identificazione generale sono lunghi e inadeguati. Per questo motivo è utile utilizzare un drone per procedere all'identificazione del prodotto da prelevare. Tuttavia, il problema è identificare appunto la posizione del prodotto. Il drone ci viene in aiuto dato che può arrivare in poco tempo ad un'altezza difficilmente arrivabile da qualsiasi altro strumento. Lo studio di F. Benes et al. permette inoltre di selezionare l'altezza adeguata in base all'altezza del magazzino, in modo di permettere al drone di identificare il prodotto da almeno due metri di distanza. La valutazione viene effettuata in base al valore RSSI (received signal strength indicator).

Per i magazzini indoor, uno studio sviluppato da Kurt Geebelen et al. ci viene in aiuto. Qui viene studiata l'accuratezza dei sensori per valutare la posizione 3D all'interno del magazzino utilizzando una piattaforma OASE flexible sensor fusion. Questo studio è effettuato utilizzando una simulazione reale di un

drone industriale con precisione calcolata al millimetro utilizzando sensibili camere e sensori. Il risultato mostra che la localizzazione del prodotto in un magazzino indoor varia da 4,4 cm ai 21 cm, in base al sensore selezionato. Questo studio di laboratorio è stato validato in uno sviluppo di un proof-of-concept di un drone con dieci ore di volo in un magazzino di 65.000 m² di grandezza. Combinando il risultato in un laboratorio con il mondo reale e variando i sensori implementati al drone, vengono quindi individuati tre tipi di utilizzo per tre diversi tipi di droni, considerando anche accuratezza e costo: droni di grandi dimensioni con vincoli di peso e costi ridotti, uno o più droni di medie dimensioni, nano droni utilizzati in numero notevole con vincoli di peso e costo.

Un'altra simulazione descritta nell'articolo di Ivan Derpich, Daniela Miranda, Juan Sepuvela, è previsto l'utilizzo di droni da trasporto in un magazzino di una società manifatturiera di scarpe per il trasporto dei prodotti dal magazzino alla workstation, cercando di minimizzare task per un team di otto persone che generalmente impiegano mediamente circa un'ora per completare task alla workstation. È stimato che questi tempi possono notevolmente essere ridotti con l'utilizzo dei droni automatici da trasporto utilizzandone in numero minimo così da poter evitare collisioni e minimizzare l'energia di cui questi necessitano. Allo scopo, viene seguito un modello matematico in cui la funzione obiettivo minimizza la distanza del viaggio dei droni, considerando alcuni vincoli: ogni drone esegue uno e un solo percorso, ogni nodo è servito da un solo drone, da un nodo parte solamente un altro drone, ogni drone ritorna alla fine del percorso al punto di partenza, ogni drone è utilizzato solo una volta, ogni drone non porta prodotti oltre la sua capacità, la rotta è continua e non ci sono stazioni intermedie.



Fig.6 – Esempio di drone automatico da trasporto

1.5 Palletizing robot

Attualmente le imprese cercano costantemente metodi per facilitare e rendere automatiche molte procedure ripetitive all'interno della catena di produzione, che facilitino di molto il lavoro umano, diminuendo tra l'altro il rischio di errore umano. È in questo contesto che si inseriscono i robot per la pallettizzazione, in grado di garantire tempistiche di ciclo più brevi, forme e dimensioni diverse per i pallet per il confezionamento e stoccaggio. Una linea di produzione che utilizza il sistema di pallettizzazione automatica attraverso robot garantisce un'elevata flessibilità ed è altamente adattabile nei movimenti di manipolazione. Inoltre, è garantita un'elevata precisione nella predisposizione dei prodotti all'interno del pallet, consentendo quindi un'alta qualità anche per quanto riguarda il packaging, un'ampia capacità del robot, alta velocità di movimentazione dei prodotti, alta affidabilità e sicurezza (Juraj Kováč, Robert Jenčík, Peter Andrejko, Mikuláš Hajduk, Zbigniew Pilat, Peter Tomči, Jozef Varga, and Martin Bezák,2020). Le capacità applicative dei robot per la pallettizzazione sono ampie e la struttura (layout) dello spazio lavorativo varia considerevolmente.

Esistono soluzioni nel quale è necessaria anche la supervisione di un operatore umano, che collabora quindi con il robot. In questo caso si parla

quindi di cobots. Qui si ha uno spazio lavorativo compatto in cui l'operatore umano effettua piccoli movimenti per completare la pallettizzazione, diminuendo il suo sforzo fisico. Il sistema è facilmente riconfigurabile e riprogrammabile. Per le piccole e medie imprese, che non hanno molto spesso la possibilità di investire ingenti risorse, il cobots può essere un'ottima soluzione per avviare una prima fase di automazione del processo di pallettizzazione, cercando nei successivi anni di passare ai robot completamente automatici per ottenere tutti i benefici generati da esso.

Solitamente, per i robot automatici addetti alla pallettizzazione, il software implementato viene sviluppato dall'azienda che li produce, dato che deve perfettamente adattarsi sia all'hardware che lo costituisce sia con il software degli altri sistemi dell'impresa che adotta la soluzione in esame. Ad esempio, sono creati software che funzionano anche offline che svolgono diverse funzioni, come la possibilità di sviluppare, compilare e simulare codici per il robot e i suoi accessori. Inoltre, l'interfaccia grafica permette all'utente di avere una miglior percezione rispetto al comportamento del robot rispetto al codice scritto (Frederico M. Moura, Manuel F. Silva, 2018). Altri produttori dei robot per la pallettizzazione includono dei programmi standard per l'esecuzione di specifiche azioni. Le uniche operazioni che l'operatore deve svolgere manualmente è l'inserimento dei dati in input attraverso il software che il robot ARP (Automatic Robot Palletizer) utilizza. Le funzioni presenti possono essere quelle del controllo del movimento, calcolo e creazione del layout del pallet, così come la selezione di funzioni ausiliarie aggiuntive.

Tutte le funzioni sono divise in tre moduli (anche chiamati programmi o moduli di sistema): ARP palletizer che si occupa dell'esecuzione e dell'aggiunta di dati addizionali, ARP movement che contiene le informazioni per il movimento del robot, ARP basic che sono funzioni non essenziali ma possono essere eseguite per migliorare le procedure. Lo spazio di lavoro ha bisogno anche di uno spazio di pickup (per far sì che il robot prenda i prodotti da pallettizzare) e uno spazio per il pallet e la sua creazione. Il robot parte sempre nella sua posizione iniziale. Dopo aver eseguito il programma, il robot calcola il layout del pallet e inizia a prendere i prodotti inseriti nell'area di pickup. Se il robot trova un errore nelle procedure, termina immediatamente il processo arrestandosi. Tutte le informazioni possono essere divise in tre categorie:

- Sistema: contiene informazioni generali sui valori del sistema, come la posizione iniziale del robot, il massimo peso trasferibile da esso ecc.
- Obiettivo: valori e informazioni riguardo il pallet, come la sua posizione, orientamento e dimensione.
- Layout: valori da raggiungere e controllare

Esistono due tipi di distribuzione degli articoli: uniforme e non uniforme. Nel primo caso, lo spazio rimanente viene diviso a metà e posizionato alle estremità del pallet. Una distribuzione non uniformata divide lo spazio in quantità uguali e lo distribuisce tra gli articoli sulle pallet e le sue estremità (Frederico M. Moura, Manuel F. Silva, 2018).

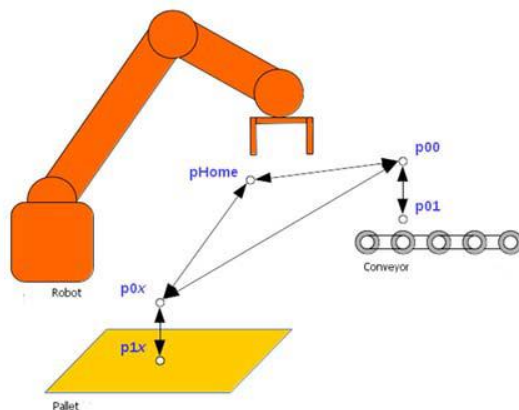


Fig.7 – Diagramma per il posizionamento del robot per la palletizzazione

1.6 Picking robot

I robot per il picking hanno lo stesso scopo degli AGV robot, cioè facilitare la movimentazione dei prodotti da una postazione all'altra, con la differenza che in questo caso non possono muoversi ma lavorano da una postazione fissa, azionando solamente il loro braccio meccanico per spostare il prodotto, spesso molto ingombrante e pesante. Anche in questo caso viene facilitato di molto il lavoro degli operatori umani, lavorando in maniera più sicura e prevenendo infortuni. Numerosi produttori di automobili stanno infatti facendo

sempre più uso di queste tecnologie nei loro processi produttivi e nei magazzini (BMW, Mercedes Benz, and Honda etc.) (Nazib Sobhan, Abu Salman Shaikat, 2021).

Un ruolo fondamentale è svolto dal software implementato sul robot in quanto è necessario che il braccio robotico non vada ad impattare con gli oggetti circostanti.

Un'applicazione importante relativa ai picking robot è quella di poter anche assemblare prodotti elementari, senza l'ausilio di un operatore che richiederebbe più tempo e più sforzi. Ad esempio, sono stati inventati molti robot automatici per il picking e l'assemblaggio di facciate nell'ambito delle costruzioni, come viene anche descritto dal brevetto proveniente da Brunkeberg System Ab (USA patent No. US8695308, 2014).

Restando nell'ambito dell'uso nel magazzino, un picking robot è dotato di sensori di profondità 3D per le operazioni di presa e scarico per permettere al braccio robotico di operare in autonomia durante le operazioni nell'area designata all'interno della pianta. Inoltre, tali sensori permettono al robot di evitare collisioni con altri oggetti. Questi robot sono in grado di identificare i prodotti leggendo il codice associato all'articolo che deve sollevare.

Alcuni di questi possono anche svolgere movimenti elementari orizzontali per spostare più facilmente il prodotto. È il caso del nuovo concept di braccio robotico flessibile che rappresenta il design tipico per l'operazione di pick and place di prodotti leggeri (Kato et al 2013). Uno dei più efficienti nell'ambito del pick and place è il robot planare (Wen-Bo Li, 2015). Per la gestione dei magazzini intelligenti, è stato sviluppato l'approccio del framework COSO per la valutazione delle attività di controllo interno. Alcuni ricercatori utilizzano tecniche di elaborazione delle immagini per trovare gli oggetti reali (Roshni et al, 2017), mentre altri ricercatori lavorano con tecniche di visione computerizzata per selezionare i diversi oggetti da collocare in diverse posizioni predeterminate in

base al colore e all'altezza (Shaikat et.al, 2020).

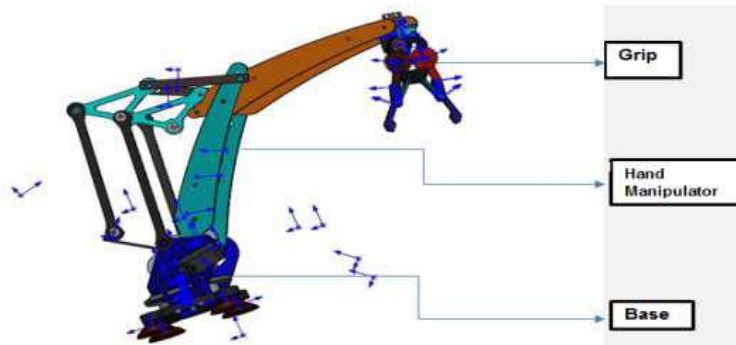


Fig.8 – Tipico braccio robotico per il pick and place

L'immagine di sopra rappresenta un design meccanico 3D per un tipico picking robot. Le parti principali che lo costituiscono sono la base, il braccio meccanico centrale e il grip all'estremità per prelevare i prodotti.

2 Metodologia

A questo punto, è possibile iniziare a visualizzare i dati presenti nel dataset creato e integrato con gli indicatori del WDI (in cui in totale sono presenti 266 Stati e zone geografiche, 1442 diversi indicatori e 62 anni registrati finendo al 2021) raggruppati per valutare se già graficamente è possibile giungere a conclusioni chiare che portano le aziende ad investire in tecnologie abilitanti la trasformazione del loro magazzino e prevedere quindi i loro comportamenti in futuro.

A partire dagli investimenti, si è tenuta traccia dell'impresa che gli ha sostenuti e delle variabili elencate nell'introduzione. In totale, sono stati trovati 113 progetti in cui si ha avuta completezza dei dati, dando quindi la possibilità di fare uno studio quantitativo preciso. Qualora non fosse stato possibile trovare il valore esatto dell'investimento (dato che molte imprese sono restie a rilasciare informazioni circa la spesa per le innovazioni), questo è stato ricavato prendendo la media del costo per applicare l'innovazione dai vari fornitori della tecnologia stessa, in modo da arrivare ad un risultato quanto più possibile vicino alla realtà. Anche per quanto riguarda i pochi dati mancanti nelle serie storiche all'interno del WDI si è tenuta conto di un'approssimazione, prendendo il dato nell'anno più aggiornato possibile. Per completezza, nello studio viene registrato anche il fornitore della tecnologia, il suo fatturato e il Paese di provenienza. Infine, per gli studi preliminari e di settore, è stato essenziale capire anche in quale settore industriale si inserisse l'impresa che ha investito. A tale scopo sono stati individuati otto settori distinti: abbigliamento, automotive, e-commerce, farmaceutico, food, logistica e distribuzione, manifatturiero e wholesaler. Per il settore manifatturiero, data la sua ampiezza, è necessario anche individuare il prodotto specifico: carta, edilizia, elettronica e informatica, gioielli, prodotti ortopedici, tecnologie per l'industria e tecnologie per lo spazio abitativo.

Nel prossimo capitolo, sarà introdotta e applicata una tecnica oggettiva in grado di spiegarci analiticamente le relazioni che sussistono tra gli investimenti e gli altri indicatori registrati per i vari paesi di appartenenza delle imprese. La tecnica adottata, dopo vari tentativi, è ricaduta sulla correlazione. In base ai

risultati ottenuti da quest'ultima, si proverà a giustificare i risultati raccolti.

2.1 Analisi dei dati

Passeremo ora ad osservare e mettere in relazione vari elementi trovati e inseriti nel database menzionato nel capitolo "Introduzione" per osservare più facilmente che tipo di dati sono stati raccolti e avanzare delle ipotesi preliminari, prima di applicare un modello di correlazione ai nostri dati per giungere a delle conclusioni quantitative che il software Minitab potrà darci.

Dovendo valutare l'andamento degli investimenti nel settore dell'industria 4.0, verranno fatte delle considerazioni partendo da questa. Da come viene mostrato in fig.9, il valore minimo e massimo degli investimenti è rispettivamente di \$ 28,800 e \$ 885,000,000. Si evince che nel dataset sono state inserite imprese che hanno fatturati molto diversi tra loro, in cui alcune non hanno disponibilità economiche importanti e in alcuni casi acquistano singole unità di AGV robot mentre altre aziende (come Amazon), avendo enormi fatturati e considerando le operazioni di magazzino fondamentali per il business possono investire cifre vicino al miliardo di dollari. Mediamente comunque vengono spesi \$ 14,754,922.12 per innovare i magazzini, cifra che resta importante se consideriamo anche la mediana pari a \$ 800,000. Primo e terzo quartile sono pari a \$ 260,000 e \$ 3,000,000 quindi almeno tre quarti delle imprese investono molto.

	Investimento
Minimo	\$ 28,800.00
Massimo	\$ 885,000,000.00
Media	\$ 14,754,922.12
Mediana	\$ 800,000.00
1° quartile	\$ 260,000.00
3° quartile	\$ 3,000,000.00

Fig.9 – Analisi investimenti

Analizzando tutti le altre variabili trovate per giustificare gli investimenti, i risultati trovati vengono presentati nelle figure seguenti. Le analisi sono

effettuate lavorando prima con le variabili espresse in valore assoluto e successivamente con quelle espresse in termini percentuali.

	Fatturato fornitore	Popolazione sull'anno	PIL sull'anno (MLD \$)	PIL pro capite (\$)
Minimo	\$ 100,000.00	3,714,000	\$ 19.70	\$ 1,927.71
Massimo	\$ 104,210,000,000.00	1,402,000,000	\$ 21,500.00	\$ 97,019.18
Media	\$ 2,143,879,677.53	150,039,876	\$ 4,510.59	\$ 41,196.82
Mediana	\$ 358,500,000.00	60,630,000	\$ 1,886.00	\$ 42,136.12
1° quartile	\$ 65,990,000.00	19,290,000	\$ 904.10	\$ 31,769.97
3° quartile	\$ 2,290,000,000.00	125,800,000	\$ 3,846.11	\$ 53,044.53

Fig.10 – Analisi variabili assolute

	Credito settore privato ass. (MLD \$)	Investimenti stranieri ass. (MLD \$)	Investimenti stranieri BoP (\$)	R&D ass. (MLD \$)
Minimo	\$ 15.74	\$ -344.54	\$ -344,331,000,000.00	\$ 0.06
Massimo	\$ 46,428.42	\$ 380.76	\$ 217,947,600,722.76	\$ 609.06
Media	\$ 7,489.91	\$ 61.25	\$ 9,279,854,461.22	\$ 116.29
Mediana	\$ 1,574.42	\$ 32.78	\$ 7,503,622,093.28	\$ 26.25
1° quartile	\$ 909.32	\$ 1.85	\$ -4,722,571,349.54	\$ 14.75
3° quartile	\$ 3,262.25	\$ 104.35	\$ 30,271,673,753.18	\$ 120.49

Fig.11 – Analisi variabili assolute

	Valore aggiunto industria ass. (MLD \$)	Spesa istruzione ass. (MLD \$)	Tempo costruzione magazzino (giorni)
Minimo	\$ 4.17	\$ 0.76	63.00
Massimo	\$ 6,005.21	\$ 1,225.50	338.37
Media	\$ 1,036.77	\$ 230.29	145.48
Mediana	\$ 407.83	\$ 85.75	126.00
1° quartile	\$ 168.85	\$ 48.87	108.35
3° quartile	\$ 1,020.44	\$ 177.94	189.50

Fig.12 – Analisi variabili assolute

	LPI track and trace (1-5)	LPI qualità servizio (1-5)	LPI frequenza arrivo in orario (1-5)	LPI complessivo (1-5)
Minimo	2.26	2.26	2.95	2.44
Massimo	4.27	4.31	4.45	4.23
Media	3.90	3.82	4.12	3.81
Mediana	4.05	3.87	4.13	3.89
1° quartile	3.83	3.66	4.03	3.74
3° quartile	4.13	4.09	4.33	4.03

Fig.13 – Analisi logistic performance index

	Crescita PIL (%)	Inflazione (% anno)	Spread interesse debito (%)	Tassa profitto (% profitti commerciali)	Credito settore privato (% GDP)
Minimo	-10.82	-0.73	-1.00	0.00	15.96
Massimo	7.02	50.00	39.65	27.90	215.95
Media	-1.62	2.41	4.02	17.91	119.82
Mediana	0.00	1.60	2.85	20.00	104.27
1° quartile	-4.57	0.61	2.19	14.60	79.62
3° quartile	2.11	2.52	5.54	23.20	163.33

Fig.14 – Analisi variabili percentuali

	Investimenti stranieri (% GDP)	R&D (%GDP)	Valore aggiunto industria (% GDP)	Spesa istruzione (% GDP)
Minimo	-37.71	0.28	15.00	3.34
Massimo	36.68	3.37	37.82	7.75
Media	0.78	2.18	23.38	5.16
Mediana	1.45	2.16	21.62	4.99
1° quartile	0.57	1.39	19.33	4.26
3° quartile	2.62	3.03	27.01	5.70

Fig.15 – Analisi variabili percentuali

Possiamo a questo punto confrontare gli investimenti con alcuni indicatori che a prima vista possono spiegare come le imprese investono, su cosa investono e quando hanno investito. Partendo dall'ultimo quesito, cioè quando le imprese hanno investito, è possibile sfruttare la fig.16 per valutare per ogni anno trovato qual è l'ammontare totale degli investimenti e trarre delle conclusioni riguardo l'andamento di questi nel passare nel tempo. Si evince come dal 2011 al 2013 l'aumento è costante, passando da \$ 240,000 a \$ 7,625,000. Nel 2014 e 2015, invece, c'è un notevole calo della tendenza, dovuto alle politiche di austerità portate avanti da parte dell'Unione Europea che hanno frenato incentivi e prestiti. Nell'anno successivo invece, dal 2016, riprende l'ascesa e c'è una vera e propria esplosione nel 2018, con investimenti totali pari ad una cifra vicina al miliardo di dollari, per poi calare nuovamente nel 2019 e negli anni successivi a causa della pandemia covid-19.

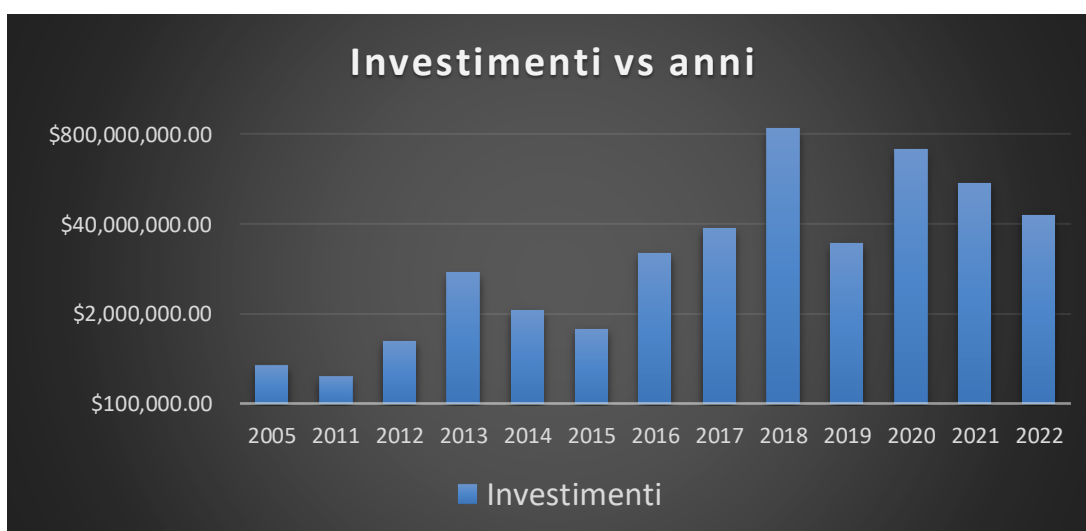


Fig.16 – Investimenti vs anni

Confrontiamo ora l'ammontare dell'investimento in tecnologie abilitanti dell'industria 4.0 e il Paese in cui tale investimento è stato fatto. In Fig.17 è presente un istogramma in cui sono stati inseriti i Paesi le cui aziende hanno fatto investimenti nel complesso superiori ai \$ 4,400,000 (i paesi totali su cui verte il database sono 29). È possibile notare facilmente che i Paesi in cui si investe di più sono USA e Giappone, rispettivamente con investimenti pari a \$549,940,000 e \$905,720,000. Molto distanti ci sono poi Germania e Brasile dove sono stati investiti circa \$ 60,000,000 per innovare i magazzini. L'Italia è ben piazzata in questo panorama, segno che la volontà di velocizzare e rendere più efficienti tutti i processi di magazzino è presente anche qui. Sorprende la presenza della Georgia nella lista dei Paesi che investono di più, infatti a fronte di un PIL di molto inferiore rispetto ad altri Paesi qui presenti (PIL 2020 pari a circa 16 miliardi di dollari), in termini percentuali investe molto di più. La relazione tra l'investimento effettuato e il PIL del Paese sarà approfondita in seguito ad una correlazione, ma possiamo a questo punto fare un confronto per ogni Paese la quota di investimenti e il PIL medio in Fig.18. In base a questo istogramma vediamo che almeno a primo impatto non si notano tendenze particolari e non possiamo quindi giungere ad alcuna conclusione. Infatti, per stati come la Cina notiamo che c'è una percentuale relativamente bassa di investimenti rispetto al PIL a differenza di altri stati come l'Italia. Infine, si può notare come in Giappone e Stati Uniti, a differenza della Cina, le imprese introducono molte innovazioni con ingenti investimenti in relazione al PIL. Per una maggior qualità dell'immagine sono stati esclusi i paesi che hanno investito meno di \$ 300,000.

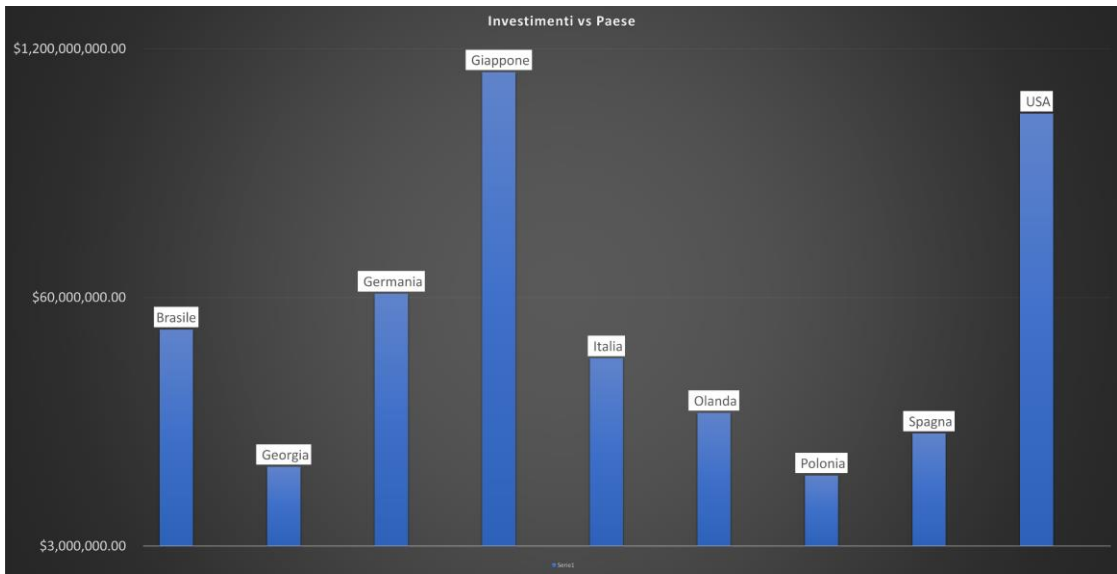


Fig.17 – istogramma investimenti vs Paese dell'azienda che investe

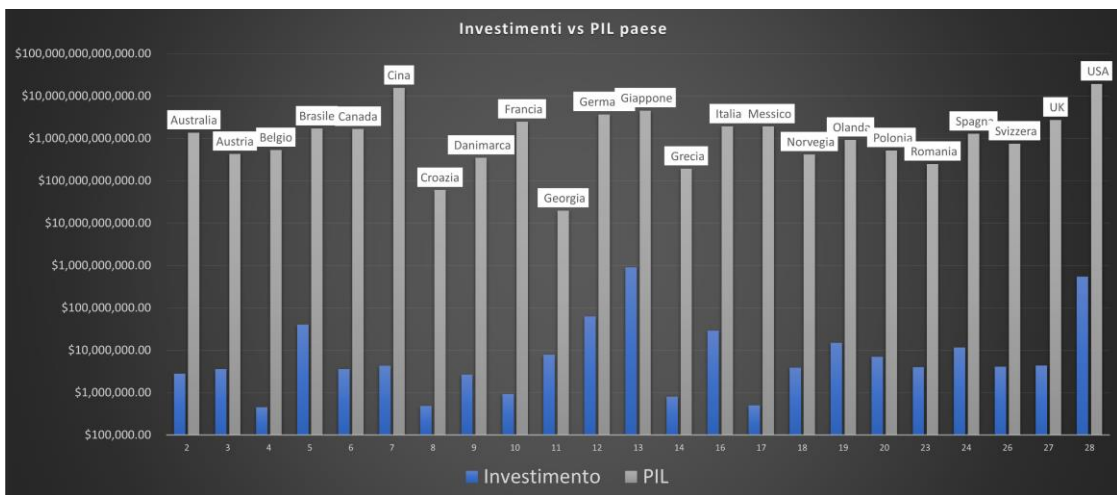


Fig.18 – investimenti in un Paese in relazione al PIL

La domanda che potremmo porci ora è se l'investimento per le imprese è influenzato dal tempo in cui un magazzino viene costruito mediamente in ogni stato dato che un'impresa potrebbe essere scoraggiata dall'introdurre una nuova tecnologia se questa sarebbe disponibile nel nuovo magazzino solo dopo molto tempo, facendo in alcuni casi ritardare la produzione. Nell'istogramma presente in Fig.19 possiamo notare la barra in azzurro che rappresenta l'investimento fatto e la linea grigia rappresenta i giorni richiesti per ultimare un magazzino (è stato creato un asse secondario data la naturale differenza tra i dati). Anche in questo caso non è presente una tendenza

specifica ma anzi si può dire che mediamente ogni stato si comporta sempre allo stesso modo da questo punto di vista. Al diminuire dei tempi di costruzione di un magazzino non si nota nessun aumento degli investimenti da parte dello stato. Anzi, nel caso del Brasile è molto strano che gli investimenti sono molto elevati rispetto ai tempi di costruzione di un magazzino dato che è la nazione dove è richiesto mediamente più tempo rispetto ad altri stati (circa 330 giorni). La Danimarca anche ha un comportamento anomalo in quanto investe molto poco rispetto alle altre nazioni nonostante abbia un'altissima efficienza di costruzione dei magazzini dato il tempo medio di circa 60/70 giorni.

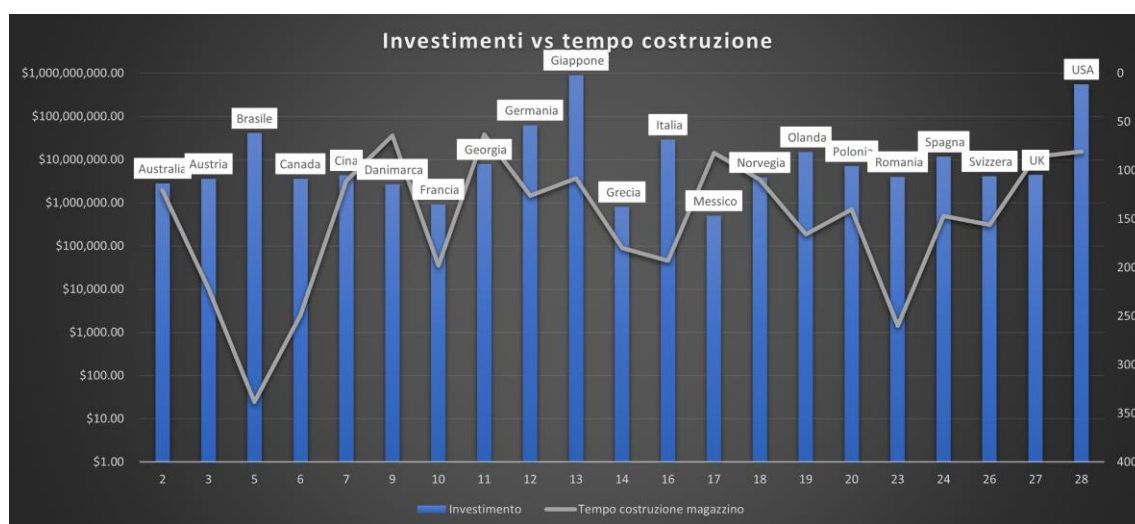


Fig.19 – istogramma su investimenti confrontati con i tempi di costruzione di un magazzino

Si passa ora ad analizzare gli investimenti in base al settore industriale di cui fanno parte le imprese innovatrici e vedremo se a colpo d'occhio possiamo dire che ci sono settori in cui gli investimenti sono più importanti (sempre considerando che possiamo fare analisi solamente sui dati raccolti, non vuole essere un discorso generico su tutte le imprese del mondo). Le aziende sono state divise in otto settori industriali differenti: abbigliamento, automotive, e-commerce, farmaceutico, food, logistica e distribuzione, manifatturiero e wholesale. Come mostrato in Fig.20, Si notano immediatamente i settori più influenti: abbigliamento ed e-commerce. Questo è spiegato per l'importanza intrinseca del magazzino (e delle sue innovazioni) per questi settori, data la

sempre più cercata velocità di evasione degli ordini. Si pensa nello specifico al fast fashion di Zara o ad Amazon, che garantiscono velocità sia di consegna che di ricambio dei prodotti, obiettivo che difficilmente può essere raggiunto se non si dispone di tecnologie all'avanguardia all'interno del magazzino, che facilitino anche gli operatori fisici con le task quotidiane e di routine. Gli investimenti sono elevati, infatti nel settore dell'abbigliamento si raggiungono investimenti di circa \$ 900,000,000 mentre per l'e-commerce \$ 460,000,000. Seguono poi i settori di logistica e distribuzione e wholesales, probabilmente per lo stesso motivo dei primi due settori. L'istogramma ci mostra i settori automotive e farmaceutica negli ultimi posti. Addirittura, nel caso dell'automotive, il totale investito non supera il milione di dollari. Molto bene anche il settore del food, dove gli investimenti vengono effettuati anche per una più corretta gestione delle temperature all'interno del magazzino data la presenza di cibi e bevande, che quindi potrebbero andare incontro a deperimento se non gestiti in maniera adeguata.

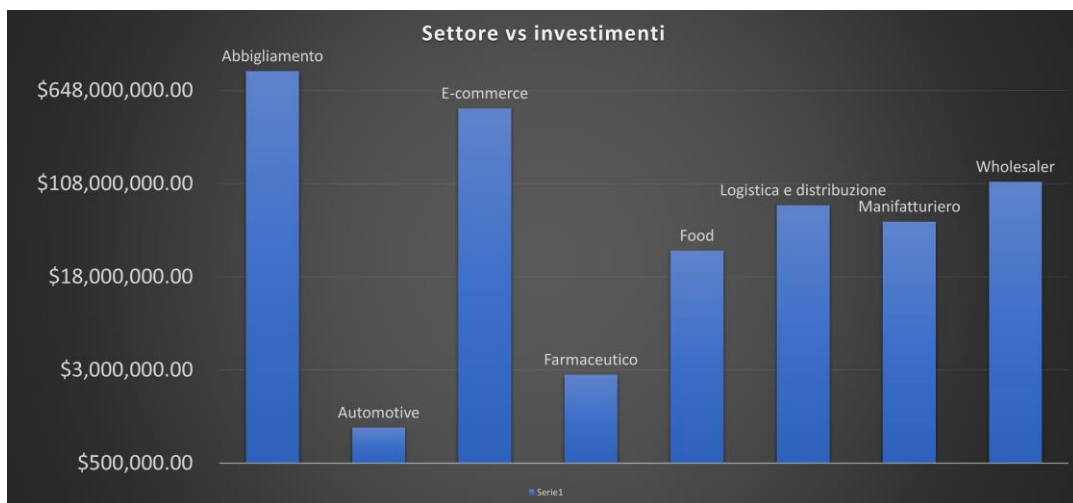


Fig.20 – istogramma investimenti vs settore industriale

Arriviamo ora a valutare che tipo di innovazione è stata introdotta nell'impresa, per vedere se c'è una tecnologia che spicca rispetto ad altre. Le tecnologie che sono state registrate nel database sono state già descritte nel capitolo di "Introduzione", in cui viene specificato anche come funziona ogni tecnologia. In Fig.21 viene a questo punto mostrato l'istogramma di riferimento per le tecnologie e l'investimento fatto. Le imprese preferiscono le tecnologie per

facilitare e velocizzare la movimentazione del prodotto, per questo motivo sono in testa gli investimenti fatti per gli AGV robot e per gli ASRS che sono pari rispettivamente a circa \$ 432,000,000 e \$ 1,137,000,000. Gli ASRS, quindi, superano addirittura il miliardo di dollari di investimenti, superando di molto anche gli AGV robot. C'è però da dire che questa disparità è generata anche dagli alti costi di questa tecnologia e dal fatto che grandi imprese, in particolar modo della logistica (Es. UPS), stanno avviando sempre più progetti di questo tipo. Molto al di sotto ci sono poi le altre tecnologie, che non superano i \$ 100,000,000. In ultimo, una considerazione sui droni automatici da trasporto: l'unica impresa che ha avviato un progetto di questo tipo è Audi per il trasporto di piccole parti delle auto da assemblare. Infatti, sebbene i droni facilitino di molto il trasporto all'interno della pianta di produzione, sfruttando il cielo e non creando disturbi ad altre movimentazioni su terra, hanno lo svantaggio di non poter sopportare carichi troppo pesanti per evitare il rischio di incidenti durante il trasporto che potrebbero creare danni a persone o macchinari. Stanno entrando in commercio negli ultimi anni sempre più droni con un maggior carico ma a quanto pare è una tecnologia ancora agli albori.

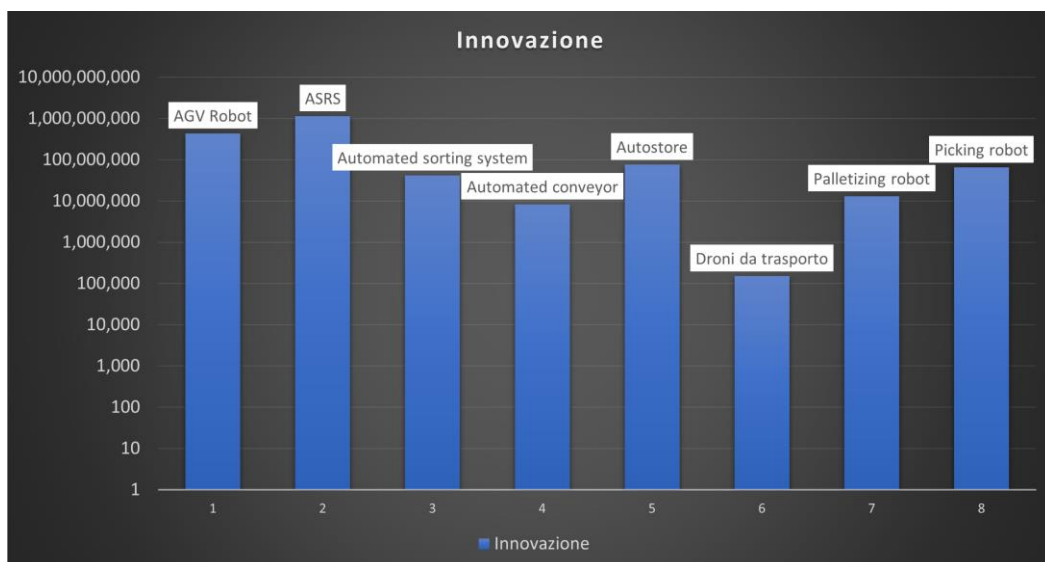


Fig.21 – istogramma investimenti vs tipologia innovazione

Ma quali sono i benefici che tali tecnologie portano all'impresa e alle routine operazionali? Come nel caso dell'elenco delle tecnologie utilizzate, anche per quanto riguarda i benefici l'elenco completo e le caratteristiche sono presenti

nel capitolo “Introduzione”. Partendo subito con le due tecnologie più utilizzate, AGV robot e ASRS, possiamo vedere graficamente la frequenza con il quale ogni beneficio si manifesta applicando queste due tecnologie in Fig.22. In particolare, nel caso degli AGV, i benefici che molte imprese hanno riscontrato sono stati un aumento della produttività, una velocizzazione della catena di processo e una riduzione dello sforzo fisico in quanto grazie ad essi è stato possibile aumentare la velocità di movimentazione dei prodotti e sfruttare più efficacemente le risorse umane. In cinque occasioni le imprese hanno notato una notevole diminuzione dei costi.

Nel caso degli ASRS, invece, per venticinque volte le imprese hanno visto un’ottimizzazione degli spazi di magazzino grazie alla ridotta dimensione di questi magazzini automatici, che sfruttano ogni centimetro fisico. Anche in questo caso c’è stato un deciso aumento della produttività reso possibile alla maggior facilità di presa dei prodotti, in cui basta selezionare quelli desiderati e in poco tempo averli nel dock per il ritiro, facilitando quindi anche il picking. In minor parte, con l’introduzione dell’ASRS, diminuiscono anche gli sforzi fisici degli addetti al magazzino.

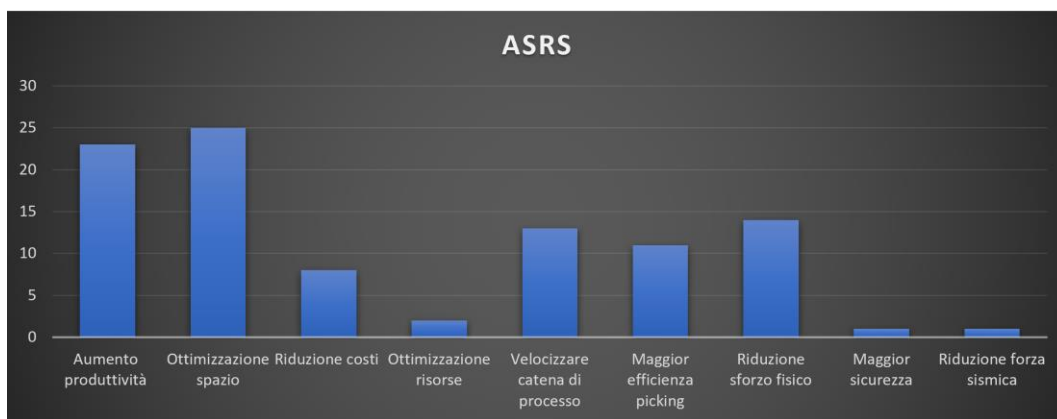
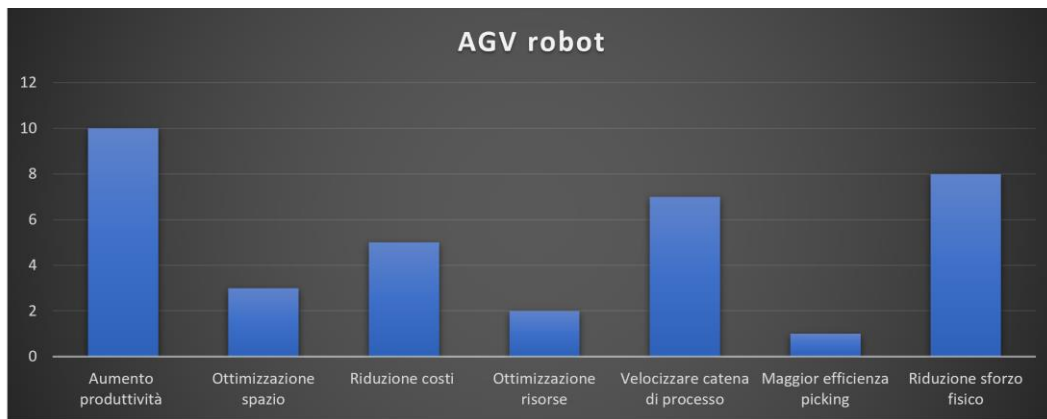


Fig.22 – benefici generati da tecnologie AGV e ASRS

La tecnologia più simile agli ASRS, gli Autostore, che sono la terza tecnologia più utilizzata in assoluto, presenta i benefici riportati in Fig.23. Qui abbiamo una parità tra ottimizzazione degli spazi, velocizzazione della catena di processo e maggior efficienza picking, con una frequenza pari a cinque. Hanno pari frequenze anche l'aumento della produttività e la riduzione dello sforzo fisico.

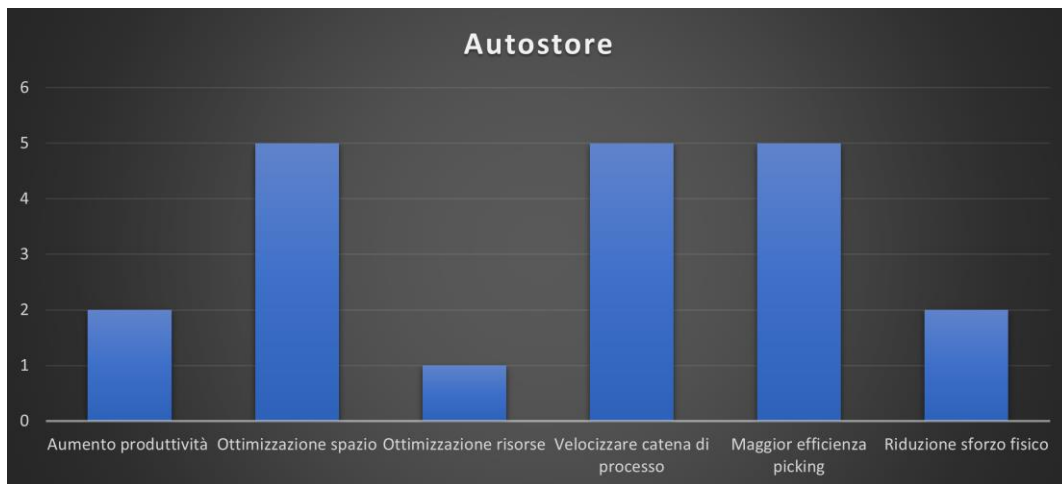


Fig.23 – benefici generati dagli Autostore

Per quanto riguarda i droni automatici da trasporto, introdotti in un solo progetto, l'unico beneficio è quello di ridurre i costi e i tempi del trasporto all'interno del magazzino.

In ultimo, abbiamo i benefici delle ultime quattro tecnologie in Fig.24: automated sorting system, automated conveyor, palletizing robot e picking robot. Per i primi due il beneficio più riscontrato è sicuramente una maggior velocità nella catena di processo. In particolare, per i sistemi di sorting, si ha anche un aumento della produttività in tre progetti distinti. Per i robot che effettuano le pallettizzazioni dei prodotti indubbiamente si avrà un aumento della produttività (i robot sono notevolmente più veloci e precisi di un operatore umano) e una riduzione dei costi (anziché utilizzare due operatori per la pallettizzazione, un'impresa può utilizzare un solo robot). In ultimo avremo i robot per il picking, in cui con una frequenza pari a due si avrà un aumento della produttività, una riduzione dello sforzo fisico (non è più un operatore umano a dover prendere i prodotti) e una maggior efficienza del picking (ad esempio raggiungere prodotti che sono immagazzinati in zone alte).

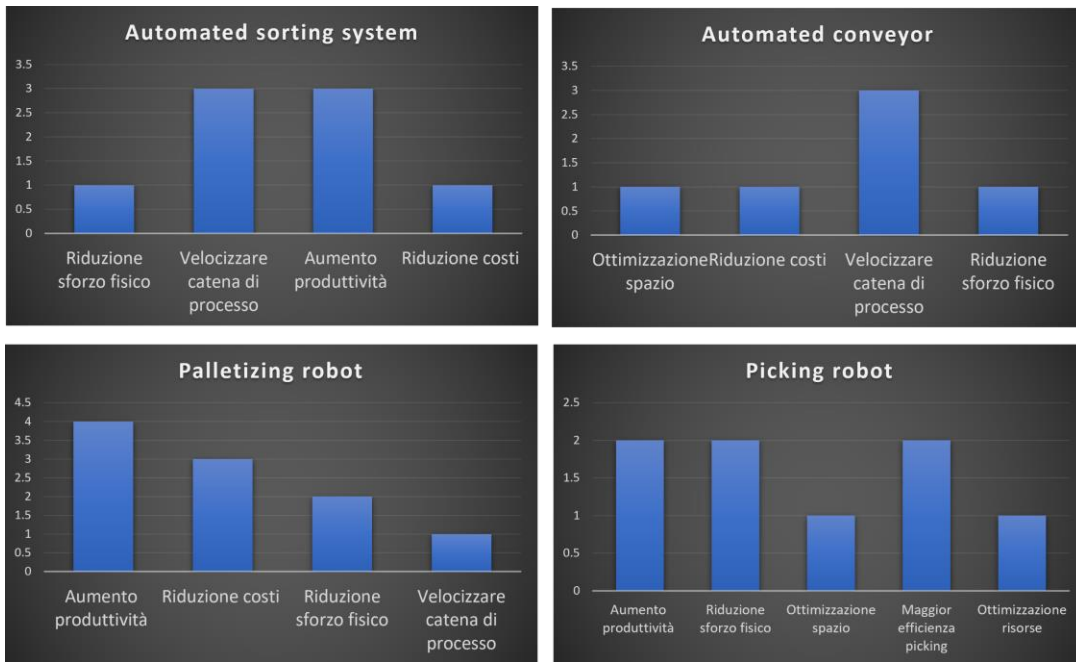


Fig.24 – i benefici generati dagli automated sorting system, automated conveyor, palletizing e picking robot

3 Correlazione

Quando siamo in presenza di due o più caratteristiche o indicatori (come nel caso in esame), uno dei possibili obiettivi è valutare se questi sono, e in che misura, collegati fra di loro in modo da formare delle relazioni tra di essi. Quando sussiste l'indipendenza, vorrà dire che questi indicatori non hanno legami tra loro. In caso contrario, si ricorre ad indici di connessione per valutare la dipendenza che esiste. Uno di questi indici è la correlazione, che studia e valuta l'interdipendenza fra le variabili in esame. Prima di spiegare precisamente come funziona la correlazione, potrebbe essere utile introdurre la covarianza.

Supponiamo di avere una variabile casuale X che tende ad assumere valori alti ogni qual volta che la variabile Y fa lo stesso. Possiamo dire che la coppia di valori (X, Y) tende ad avere valori alti o bassi rispetto al loro valore atteso. Possiamo ora dare una misura di questa associazione (X, Y) attraverso la covarianza. Otteniamo così una misura di concordanza piuttosto che di dipendenza. Quest'ultima dovrebbe infatti essere in un range di valori compresi tra 0 e 1 $[0, 1]$, mentre la correlazione e la covarianza sono espresse in range tra -1 e 1 $[-1, 1]$. La covarianza, quindi, espressa come valore atteso del prodotto tra la differenza di X e il suo valore atteso e quella di Y e il suo valore atteso:

$$Cov(X, Y) = E[(X - E[X])(Y - E[Y])];$$

Il valore sarà quindi positivo nel caso $X > E[X]$ e $Y > E[Y]$ oppure nel caso i valori osservati siano entrambi minori rispetto al loro valore atteso, poiché il segno dei due fattori sarà lo stesso. Se i segni sono diversi, la covarianza sarà negativa. Quando la covarianza è positiva, possiamo aspettarci che all'aumento del valore della variabile X ad esempio, seguirà automaticamente un aumento positivo anche della variabile Y (vale anche per una diminuzione di questi due valori, che porta ad una riduzione anche dell'altra). Quando invece la covarianza restituisce un valore negativo, in quel caso un aumento del valore della variabile X o Y si porta dietro una riduzione del valore dell'altra

variabile. Per semplificare le operazioni durante i calcoli, la covarianza può essere anche espressa come segue:

$$\begin{aligned}Cov(X, Y) &= E[(X - E[X]) \cdot (Y - E[Y])] \\&= E[XY - E[X] \cdot Y - X \cdot E[Y] + E[X] \cdot E[Y]] \\&= E[XY] - E[X] \cdot E[Y];\end{aligned}$$

Quindi se X e Y sono indipendenti, il valore della covarianza sarà nullo in quanto il valore atteso del prodotto di X e Y è uguale al prodotto del valore atteso di X e il valore atteso di Y.

Un problema successivo sorge quando ci si chiede se ad esempio una covarianza di cento è grande o piccola. Qui subentra la correlazione che è indipendente a questi valori, e definiamo il coefficiente di correlazione $\rho_{X,Y}$:

$$\rho_{X,Y} = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var(X)}\sqrt{Var(Y)}}$$

Anche il coefficiente di correlazione varia in un range tra -1 e 1 $[-1, 1]$. Un valore vicino a 1 mostra una forte correlazione positiva mentre un valore vicino a -1 mostra una forte correlazione negativa. Se questo coefficiente è zero si può parlare di una non correlazione tra le variabili.

Esistono due metodi di correlazione: correlazione di Pearson e di Spearman. La prima, anche indicata con la lettera r, è quella più comune e indica una misura della relazione lineare tra due variabili continue. Una relazione è lineare quando al cambio di una variabile segue una variazione proporzionale nell'altra variabile. Per esempio, è possibile usare la correlazione di Pearson per valutare se in una fabbrica di cioccolato all'aumentare della temperatura di produzione è associata una riduzione dello spessore della tavoletta di cioccolato. La correlazione di Spearman, invece, valuta la relazione monotona tra due variabili ordinali o continue. In una relazione monotona, le variabili variano insieme ma non proporzionalmente o a ritmo costante. Questo metodo si basa su una classifica di valori per ogni variabile piuttosto che su dati grezzi. Ad esempio, si potrebbe utilizzare una correlazione di Spearman per valutare

se l'ordine in cui i dipendenti completano un esercizio di prova è correlato al numero di mesi di esperienza. È sempre una buona idea esaminare la relazione tra le variabili utilizzando uno scatter plot (grafico a dispersione). Grazie a questi grafici, infatti, è possibile avere graficamente una prima risposta sul tipo di relazione che esiste tra due variabili. Possiamo di seguito elencare i tipi più comuni di relazioni:

- Nessuna relazione (fig.25a): i punti cadono casualmente nel grafico, il che indica l'assenza di qualunque tipo di relazione
- Moderata relazione positiva (fig.25b): Alcuni punti si posizionano vicino alla linea ma altri sono lontani
- Forte relazione positiva (fig.25c): I punti si posizionano in prossimità della linea
- Forte relazione negativa (fig.25d): i punti si posizionano in prossimità della linea ma all'aumentare di una variabile diminuisce l'altra
- Relazione monotona (fig.25e): I punti seguono un andamento specifico che non è più lineare e le variabili non cambiano più in maniera costante
- Curva quadratica (fig.25f): In questo caso i punti seguono un andamento simile a quello di una curva quadratica. Anche se la relazione è forte, il coefficiente di correlazione sarà prossimo allo zero. La relazione non è né lineare né monotona

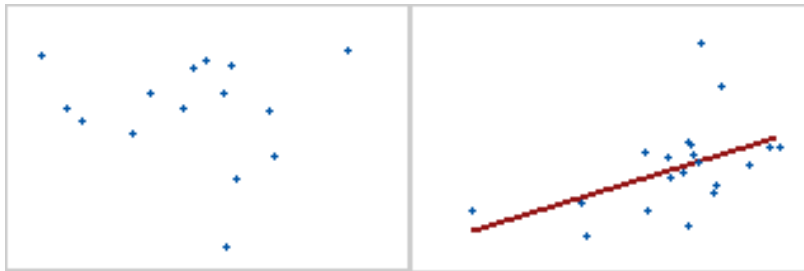


Fig. a

Fig. b

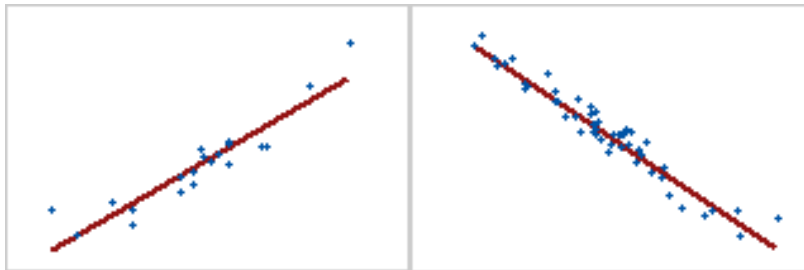


Fig. c

Fig. d

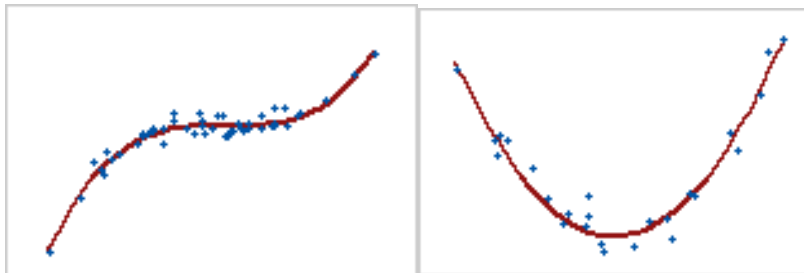


Fig. e

Fig. f

Il segno del coefficiente indica la direzione della relazione. Se entrambe le variabili tendono ad aumentare o diminuire insieme, il coefficiente è positivo e la linea che rappresenta la correlazione è inclinata verso l'alto. Se una variabile tende ad aumentare al diminuire dell'altra, il coefficiente è negativo e la linea che rappresenta la correlazione è decrescente.

3.1 Output correlazione

Attraverso l'uso del software Minitab, è stato possibile ottenere le correlazioni (utilizzando l'indice di Pearson) tra l'investimento fatto e tutte le altre variabili trovate per ogni paese. In questo modo, possiamo stabilire con una certa sicurezza quali di queste variabili giocano effettivamente un ruolo chiave per decidere se e quanto investire. Di seguito, in Fig.26, è possibile vedere l'output

in cui in giallo sono indicate le variabili significative (con significatività α pari al 5%) e il valore r dell'indice di Pearson (che va da un range tra -1 e 1) che spiega in che modo quella variabile influenzi gli investimenti.

		Investimento
Fatturato fornitore	r	0.151
	p	0.115
Popolazione	r	0.192
	p	0.043
Pil anno	r	0.225
	p	0.018
PIL pro capite (\$)	r	-0.027
	p	0.780
Crescita PIL (%)	r	-0.154
	p	0.107
Inflazione (% anno)	r	0.042
	p	0.660
Spread interesse debito (%)	r	0.131
	p	0.172
Tassa profitto (%)	r	0.138
	p	0.148
Credito settore privato (% GDP)	r	0.096
	p	0.316
Credito settore privato ass. (M	r	0.216
	p	0.023
Investimenti stranieri (% GDP)	r	-0.070
	p	0.464
Investimenti stranieri ass. (ML	r	0.076
	p	0.426
Investimenti stranieri BoP	r	0.104
	p	0.278
R&D (%GDP)	r	-0.028
	p	0.774
R&D ass. (MLD)	r	0.224
	p	0.018
Valore aggiunto industria (% GDP)	r	-0.095
	p	0.324
Valore aggiunto industria ass.	r	0.207
	p	0.030
Spesa istruzione (% GDP)	r	-0.169
	p	0.075
Spesa istruzione ass. (MLD)	r	0.189
	p	0.047
Tempo costruzione magazzino (giorni)	r	0.053
	p	0.583
LPI track and trace (1- 5)	r	-0.041
	p	0.672
LPI qualità servizio (1-5)	r	-0.023
	p	0.807
LPI frequenza arrivo in orario (1-5)	r	-0.179
	p	0.061
LPI complessivo (1-5)	r	-0.057
	p	0.556

Fig.26 – output correlazione di Pearson

Con molta sorpresa, si nota che tra le 24 variabili potenzialmente rilevanti scelte dal world development index (WDI) solamente sei sono significative statisticamente e correlate con gli investimenti. Anche il tempo di costruzione magazzini, che fin dal primo momento era stata ipotizzata come una variabile in grado di spiegare l'andamento degli investimenti, non rientra tra quelle significative. Non rientrano tra le variabili significative neanche i cinque logistic performance index (LPI), indicatori che spiegano l'abilità del paese nel saper gestire la logistica totale.

Parlando ora delle variabili significative, notiamo che la popolazione è debolmente significativa e, seppur correlata, l'indice di Pearson r è pari a 0,192. La correlazione tra popolazione e investimento è spiegata con il fatto che le imprese investono di più in territori molto popolati per raggiungere in fretta la propria clientela, aumentando anche la soddisfazione di quest'ultima che vede arrivare i prodotti con maggior celerità. È altamente significativo il PIL di un paese (nell'anno in cui il progetto è portato a termine) con un r più alto rispetto a prima, pari a 0,225, valore più alto di correlazione tra tutte le variabili. Infatti, in paesi con un PIL più alto, che rappresenta indirettamente il grado di sviluppo di un paese rispetto ad un altro, le imprese sono più incentivate ad investire dato che qui possono essere presenti mercati più grandi e redditizi. In paesi con un PIL alto, inoltre, ci sono anche un numero di imprese maggiore e quindi, per poter prevalere su altre, un'impresa è costretta ad investire sempre di più per mantenere alta la qualità delle sue operazioni e battere la concorrenza. Infatti, la concentrazione maggiore di innovazioni nei magazzini si è riscontrata negli Stati Uniti, paesi della zona Euro e in Cina. Un'altra importante variabile significativa è il credito concesso al settore privato (in termini assoluti) da parte di banche e istituti di credito. Grazie alla concessione di liquidità tramite prestiti e finanziamenti a fondo perduto, le imprese hanno l'occasione di rilanciare il patrimonio tecnologico del magazzino e aumentare la loro efficienza. È però rilevante che, seppur agendo con autonomia, le banche e gli istituti di credito sono fortemente influenzate dalle politiche messe in atto in ambiti economici e finanziari dai vari stati, dovendo quindi adeguarsi ai tassi di rendimento concessi (es. Unione Europea). Altamente significativa, con un indice di Pearson pari a 0,224, è la variabile di ricerca e sviluppo in termini assoluti, con cui si identifica la quota

che le imprese mettono a disposizione per ricercare tecnologie di sostenere le sfide future e battere in molti casi la concorrenza. Infatti, aumentando la quota destinata alla R&D, è possibile notare un aumento degli investimenti nell'automazione dei magazzini, permettendo di raggiungere i vari benefici fin qui elencati per via dell'automazione. Il valore aggiunto dell'industria (in termini assoluti), definito come la differenza fra il valore della produzione di beni e servizi e i costi sostenuti da parte delle singole unità produttive per l'acquisto di input produttivi, a essa necessari, presso altre aziende (Treccani), è la quarta variabile maggiormente correlata con gli investimenti. Dove c'è un maggior valore aggiunto della singola impresa, questa tenderà ad utilizzarlo anche per avviare progetti in grado di rientrare nell'investimento e guadagnarci maggiormente rispetto a prima. L'impresa, inoltre, con un alto valore aggiunto cercherà di investire anche per abbassare la tassazione tramite ammortamento, possedendo inoltre tecnologie in grado di poter far diventare più profittevole l'impresa successivamente. In ultimo, abbiamo la variabile di spesa impiegata nell'istruzione (in termini assoluti) da parte dei singoli stati, debolmente significativa. Come indicato dall'OECD, "mentre i paesi lottano per rispondere alle trasformazioni economiche, ambientali e sociali, inclusi i progressi tecnologici, i cambiamenti climatici e le migrazioni, il capitale intellettuale è diventato la risorsa più preziosa del nostro tempo. Il nucleo del capitale intellettuale è la conoscenza". Grazie alla spesa impiegata nell'istruzione, uno stato può avere la possibilità di formare giovani in grado di essere più propensi all'utilizzo di tecnologie impiegate per facilitare tutto l'habitat industriale (e dei magazzini) e anche per migliorare la sicurezza e il welfare di tutto il capitale umano presente in un'impresa. L'istruzione è altresì importante per la possibilità di ricercare tecnologie sempre più nuove e all'avanguardia da utilizzare nelle industrie.

4 Previsioni future industry 4.0

L'ultimo decennio ha assistito a un rapido progresso di tecnologie come Internet of Things (IoT), intelligenza artificiale (AI), robotica, mobile, cloud computing, analisi dei big data, additive manufacturing (stampa 3D) e realtà virtuale e aumentata. Queste tecnologie, insieme alla massiccia proliferazione dei big data, generati principalmente da dispositivi connessi (IoT), stanno limando la differenza tra fisico e digitale.

Il periodo successivo vedrà l'emergere della fase cinque o Industry 5.0 che, anche se non chiaramente definito in questa fase, potrebbe includere la produzione in serie personalizzata di beni. Gli umani probabilmente saranno da reintrodurre nella catena di produzione e nella gestione del magazzino per collaborare con robot avanzati e creare prodotti parzialmente artigianali. Questo dovrebbe inaugurare l'era della personalizzazione di ogni prodotto come

contrapposta a quella della mass customization, che è il segno distintivo dell'Industry 4.0.

Lo scenario manifatturiero tradizionale era incentrato sulla convinzione che quello che è meno costoso è meglio. Ma ne è derivata una crescente domanda di personalizzazione e maggior efficienza abilitate dalla digitalizzazione in un crescente spostamento verso la produzione locale. Le nazioni orientali a basso costo, in particolare la Cina continentale non sono più la prima scelta per i nuovi impianti di produzione, con magazzini e stabilimenti che sono in costruzione più vicini ai centri di domanda. Questo cambiamento è stato accelerato con la pandemia di COVID-19 in accordo con quanto detto da Alexander Stiehle, analista in UBS:

“Dopo il Covid-19, riteniamo che le aziende inizieranno a localizzare molti dei loro magazzini e stabilimenti produttivi. Le fabbriche dovranno essere più digitalizzate e automatizzate a produrre quantità minori in modo efficiente con la produzione localizzata. L'Industrial Internet of Things, 5G e software industriale sono tutti elementi chiave nonché fattori abilitanti della trasformazione verso la produzione intelligente”

Un punto da considerare è quello riguardante il rischio della perdita di lavoro

per i dipendenti dell'impresa, giustamente preoccupati nel veder il loro lavoro sostituito con quello dei robot o di tecnologie automatizzanti. Nell'immagine sottostante viene rappresentata la percentuale dei lavori a rischio in base a degli studi effettuati su Stati Uniti, Germania, Regno Unito e Giappone. Quel che si nota è una percentuale decisamente preoccupante, specialmente nelle prime due che toccano quote pari al 38% e 35%. Secondo uno studio di PwC, circa il 38% dei posti di lavoro negli Stati Uniti potrebbe essere potenzialmente ad alto rischio automazione all'inizio degli anni 2030, rispetto a Germania (35%), Regno Unito (30%) e Giappone (21%). Il rapporto rivela inoltre che i rischi saranno più alti nel trasporto e nello stoccaggio (56%), dal settore manifatturiero (46%), all'ingrosso e al dettaglio (44%), ma inferiore in settori come la sanità e il lavoro sociale (17%).

Potential jobs at high risk due to automation by 2030¹

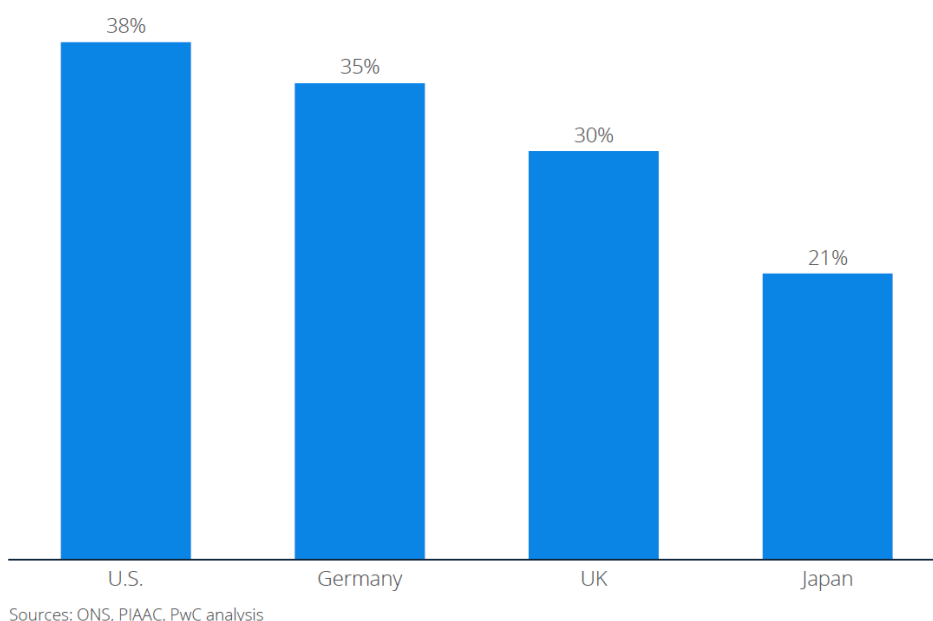


Fig.27 – percentuale lavoro a rischio automazione

Contrariamente alla credenza popolare, l'automazione non si tradurrà in una perdita di posti di lavoro, ma solo in uno spostamento dei ruoli. Sebbene sia probabile che le macchine assumano la maggior parte delle attività manuali ripetitive, il risultato dello spostamento dei lavoratori sarà seguito anche dall'emergere di nuove opportunità grazie alla presenza di posti di lavoro più

qualificati e una migliore formazione. GE (General Electric) stima che entro il 2030 l'IoT industriale aggiungerà valore all'economia mondiale più di tutti i principali paesi, ad eccezione degli Stati Uniti e della Cina continentale, portando più lavoro e maggiori redditi.

L'uso dell'IA e della robotica nella produzione e nelle operazioni di magazzino può essere fatto risalire al 1954, quando George Devol brevettò un progetto per un braccio meccanico programmabile ed è stato commercializzato nel 1961 dall'imprenditore statunitense Joseph Engelberger. Da allora, le tecnologie per l'IA e la robotica sono progredite molto e ora si portano al centro dell'Industria 4.0 e della fabbrica intelligente. Infatti, secondo uno studio del 2016 del MIT, i team composti da esseri umani e robot che collaborano in modo efficiente possono essere l'85% più produttivi dei team fatti di esseri umani o di soli robot.

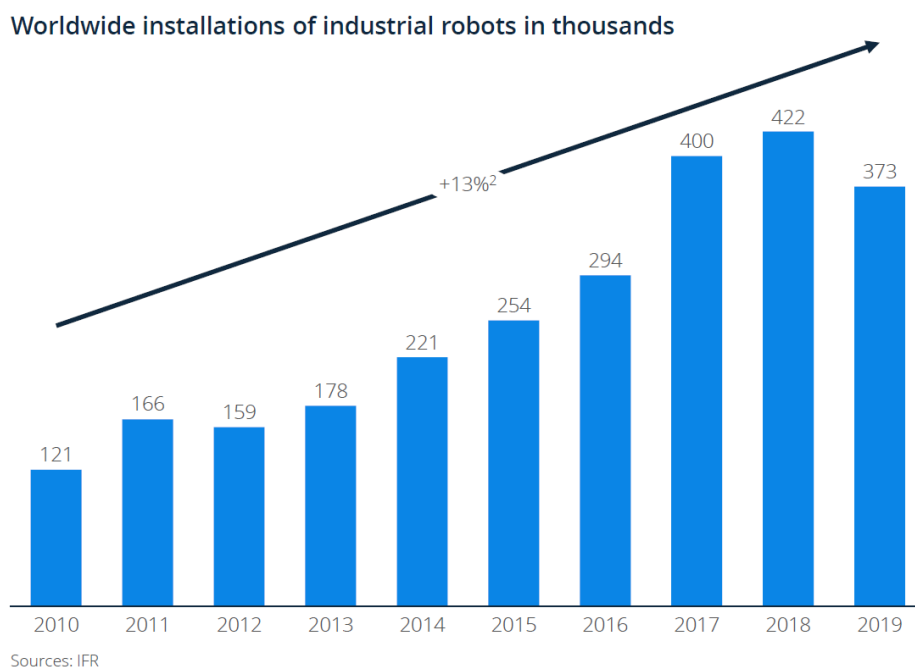
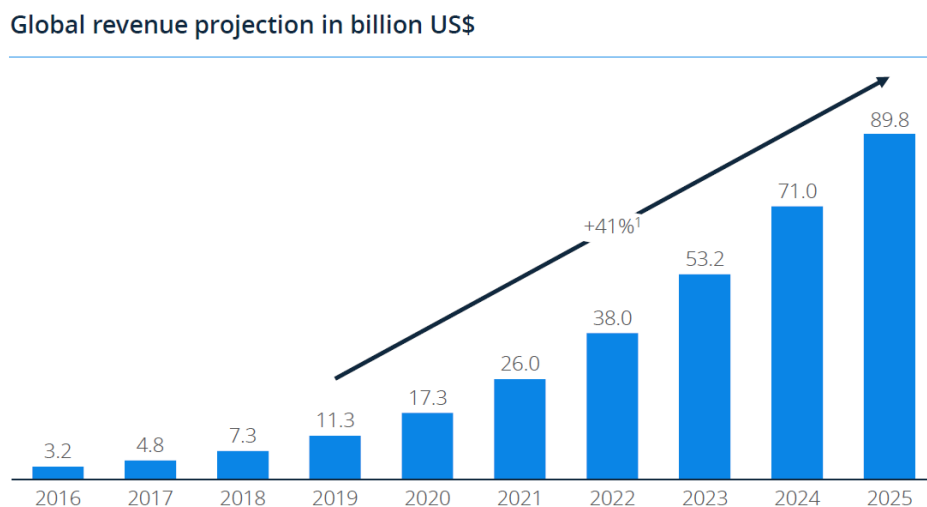


Fig.28 – numero di installazioni nel mondo di robot industriali

Anche se i robot industriali stanno assistendo gli esseri umani da un po' di tempo, sono gli sviluppi delle reti neurali e più specificamente nel deep learning, che consentono loro di apprendere e adattarsi a situazioni nuove senza alcun intervento umano. L'IA ha ora automatizzato molti elementi del processo produttivo e di immagazzinamento, compresi quelli che richiedono

capacità cognitive umane. Nell'immagine sottostante è presente l'aumento previsto del CAGR per le tecnologie AI e robot industriali.



Sources: Tractica

Fig.29 – previsione aumento del CAGR nei prossimi anni su AI e robot industriali

Anche per quanto riguarda la tecnologia VR/AR con il passare degli anni ci sono state molte migliorie, che in parte sono già state adottate dalle imprese e in parte si espanderanno nei prossimi anni. La realtà virtuale (VR) è una simulazione generata dal computer di un ambiente di vita reale che consente all'utente di vivere una situazione particolare in prima persona. La realtà aumentata (AR) d'altra parte è anch'essa una simulazione al computer che non solo crea un ambiente virtuale che rispecchia quello reale, ma aggiunge miglioramenti virtuali su di esso, al fine di renderlo più interattivo per l'utente. Anche se l'uso di AR e VR nella produzione industriale e gestione del magazzino è ancora nelle sue fasi nascenti, esso può essere già utilizzato per una varietà di operazioni, come ad esempio per selezionare parti di apparecchiature in un magazzino, ricevere istruzioni di riparazione su dispositivo mobile, impartire istruzioni ai tecnici, controllare la qualità, gestire il rischio e la sicurezza dei lavoratori e anche in supporto logistico. Prima dell'avvento dell'AR/VR, i lavoratori si destreggiavano nel magazzino selezionando l'articolo corretto tramite RFID o lettori di codici a barre, un processo ingombrante e dispendioso in termini di tempo. Tecnologie come

occhiali intelligenti non solo aiutano i dipendenti a tenere sempre sotto controllo le liste di prelievo, ma anche a mostrare loro il percorso migliore lungo la pianta del magazzino. Questo aiuta a ridurre gli errori, diminuendo il tempo speso e una riduzione del tempo dedicato alla formazione. Questo ha dimostrato di essere importante per i rivenditori soprattutto durante l'alta stagione, quando i dipendenti temporanei o entry level svolgono tali attività.

Sitografia e bibliografia

Ali, A. K., Lee, O. J., & Song, H. (2021). Robot-based facade spatial assembly optimization. *Journal of Building Engineering*, 33, 101556

Beckschäfer, M., Malberg, S., Tierney, K., & Weskamp, C. (2017, October). Simulating storage policies for an automated grid-based warehouse system. In *International Conference on Computational Logistics* (pp. 468-482). Springer, Cham

Boysen, N., Briskorn, D., Fedtke, S., & Schmickerath, M. (2019). Automated sortation conveyors: A survey from an operational research perspective. *European Journal of Operational Research*, 276(3), 796-815

Brandimarte, P., & Zotteri, G. (2007). *Introduction to distribution logistics*. John Wiley & Sons

Derpich, I., Miranda, D., & Sepulveda, J. (2018, May). Using drones in a warehouse with minimum energy consumption. In *2018 7th International Conference on Computers Communications and Control (ICCCC)* (pp. 97-102). IEEE

Dev Mehta, Leonie Senn-Kalb, *In-depth: Industry 4.0 2021*, Statista Digital Market Outlook, June 2021

Hao, J., Shi, H., Shi, V., & Yang, C. (2020). Adoption of automatic warehousing systems in logistics firms: A technology–organization–environment framework. *Sustainability*, 12(12), 5185.

Kováč, J., Jenčík, R., Andrejko, P., Hajduk, M., Pilat, Z., Tomči, P., ... & Bezák, M. (2019, June). Integrated Palletizing Workstation with an Industrial Robot and a Cobot. In *International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube*

Region (pp. 202-209). Springer, Cham

Lamballais, T., Roy, D., & De Koster, M. B. M. (2017). Estimating performance in a robotic mobile fulfillment system. *European Journal of Operational Research*, 256(3), 976-990

Moura, F. M., & Silva, M. F. (2018, April). Application for automatic programming of palletizing robots. In *2018 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)* (pp. 48-53). IEEE

Radácsi, L., Gubán, M., Szabó, L., & Udvaros, J. (2022). A Path Planning Model for Stock Inventory Using a Drone. *Mathematics*, 10(16), 2899

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

Sobhan, N., & Shaikat, A. S. (2021, August). Implementation of Pick & Place Robotic Arm for Warehouse Products Management. In *2021 IEEE 7th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)* (pp. 156-161). IEEE

Vicario, G., & Levi, R. (2019). *Metodi statistici per la sperimentazione*. Società Editrice Esculapio

Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook. *International journal of distributed sensor networks*, 12(1), 3159805

Zou, B., De Koster, R., Gong, Y., Xu, X., & Shen, G. (2021). Robotic Sorting Systems: Performance Estimation and Operating Policies Analysis. *Transportation Science*, 55(6), 1430-1455

https://www.cassioli.com.es/wp-content/uploads/2021/06/CASE-STUDY-PRODEMAN-ITA-2.pdf?_ga=2.8926709.1916286217.1654261539-268648225.1654261539

<https://www.swisslog.com/it-it/casi-di-successo-e-referenze/casi-di-successo/2020/12/linfox-logistics>

https://www.youtube.com/watch?v=MLof6oA64us&ab_channel=Swisslog"

<https://www.swisslog.com/it-it/casi-di-successo-e-referenze/casi-di-successo/2021/11/blum-australia>

https://ftdmag.co.nz/2022/03/23/blum-builds-futureproof-warehouse-with-more-swisslog-automation/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=blum-builds-futureproof-warehouse-with-more-swisslog-automation

<https://www.systemlogistics.com/int/news/news/an-automated-warehouse-for-coca-cola-hbc-in-austria>

https://www.youtube.com/watch?v=XqQv4W8r6i4&t=36s&ab_channel=ScottAutomation%2BRobotics

https://www.youtube.com/watch?v=PiDh3Pz3xZI&ab_channel=ScottAutomation%2BRobotics

<https://www.cassioli.it/case-studies/case-study-havan/>

https://www.youtube.com/watch?v=v2hlcc4mc5c&ab_channel=CassioliS.r.l

https://www.cassioli.it/wp-content/uploads/2021/03/CASE-STUDY-MOR-ITA-1.pdf?_gl=1*1lyphne*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjw4uaUBhC8ARIsANUuDjXOk

[XJA2VzMISjphmD4X55Wmz7WAWsqvNhARydCHTcwcBRsQi-gxcgaAsykEALw_wcB](https://www.cassoli.it/wp-content/uploads/2021/03/CASE-STUDY-SUZANO-ITA.pdf?_gl=1*n36xat*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjw4uaUBhC8ARIsANUuDjXOKXJA2VzMISjphmD4X55Wmz7WAWsqvNhARydCHTcwcBRsQi-gxcgaAsykEALw_wcB)

https://www.cassoli.it/wp-content/uploads/2021/03/CASE-STUDY-SUZANO-ITA.pdf?_gl=1*n36xat*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjw4uaUBhC8ARIsANUuDjXOKXJA2VzMISjphmD4X55Wmz7WAWsqvNhARydCHTcwcBRsQi-gxcgaAsykEALw_wcB

https://www.cassoli.it/wp-content/uploads/2021/04/CASE-STUDY-TRAMONTINA-ITA.pdf?_gl=1*1lyphne*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjw4uaUBhC8ARIsANUuDjXOKXJA2VzMISjphmD4X55Wmz7WAWsqvNhARydCHTcwcBRsQi-gxcgaAsykEALw_wcB

<https://www.bastiansolutions.com/resources/case-studies/e-commerce/dafiti-group/>

https://www.youtube.com/watch?v=8JHbHU9Y4Yg&ab_channel=BastianSolutions

<https://blog.kardex-remstar.com/case-studies/hcl-logistics>

https://www.mmh.com/article/hcl_logistics_implements_vertical_lift_modules

<https://us.blog.kardex-remstar.com/asrs-cost-factors>

<https://blog.kardex-remstar.com/case-studies/tsc>

<https://us.blog.kardex-remstar.com/asrs-cost-factors>

<https://www.marketscreener.com/quote/stock/KARDEX-HOLDING-AG-5252517/news/Kardex-TSC-jewelry-distribution-25398159/>

https://www.youtube.com/watch?v=24Wc69V5IUo&list=PLJMFeyj6RMjQ0aKpqHU1ZbnKgLMObuqut&ab_channel=BastianSolutions

<https://www.bastiansolutions.com/resources/case-studies/consumer-goods/richelieu/>

"https://www.youtube.com/watch?v=a1jAedgcQ_s&ab_channel=GeekPlus-Logistics%26WarehouseAutomation

<https://blog.geekplus.com/case-studies/inlaylink-deployed-geek-moving-system-to-improve-material-handling-efficiency>

<https://newsroom.fedex.com/newsroom/fedex-launches-ai-powered-sorting-robot-to-drive-smart-logistics/>

<https://www.seer-group.com/case/8.0>

<https://www.seer-group.com/case/6.0>

<https://www.warehouseautomation.ca/news-notes-1/2021/9/7/ikea-store-implements-micro-fulfillment-concept>

<https://www.bila-automation.com/case-stories/dairy/arla-birkum-mix-packing>

<https://www.bila-automation.com/case-stories/dairy/arla-r%C3%B8dk%C3%A6rsbro>

<https://www.bila-automation.com/case-stories/agv/driverless-forklift-truck-reduces-wasted-time-and-stress-in-fish-plant-logistics>

<https://www.bila-automation.com/case-stories/agv/dragsbaek-agv>

<https://www.bila-automation.com/case-stories/agv/hydra-grene-agv>

<https://www.bila-automation.com/case-stories/agv/lantm%C3%A4nnen-global-agv>

<https://www.bila-automation.com/case-stories/agv/br%C3%B8drene-a-o-johansen-save-60-80-on-their-internal-logistics>

<https://www.bila-automation.com/case-stories/crispy-food>

<https://www.bila-automation.com/case-stories/robots-help-danpo-improve-volume-quality-and-work-environment>

<https://it.blog.kardex-remstar.com/featured/la-logistica-si-fa-bella-kardex-per-yves-rocher>

<https://blog.kardex-remstar.com/case-studies/yves-rocher>

<https://www.marketscreener.com/quote/stock/KARDEX-HOLDING-AG-5252517/news/Kardex-Yves-Rocher-uses-fireproof-storage-systems-from-Kardex-Remstar-23436625/>

<https://www.vanderlande.com/references/ciblex/>

https://www.youtube.com/watch?v=ojO6B76WsvU&ab_channel=GeekPlus-Logistics%26WarehouseAutomation

<https://blog.geekplus.com/case-studies/verte>

<https://media-live2.prod.scw.jungheinrichcloud.com/resource/blob/411732/4708762c5c54504fec11d00045dd1e6/reference-sheet-avo-data.pdf>

<https://blog.kardex-remstar.com/case-studies/hauni>

<https://www.dcvelocity.com/media/videos/play/124>

<https://media-live2.prod.scw.jungheinrichcloud.com/resource/blob/601478/aa7267f8e00d84998248217c63c811dc/scheda-riferimenti-rudolph-gruppo-logistik-data.pdf>

https://www.jungheinrich.com/fileadmin/Redaktion/Themen_und_Reportagen/2017/6/6113_17_REPORT_Online-Versandhaus_V3.pdf

<https://www.audi-mediacycenter.com/en/audi-techday-smart-factory-7076/logistics-7082>

<https://media-live2.prod.scw.jungheinrichcloud.com/resource/blob/601410/34bd5d82a367174d6df5e7c93c6bd656/referenza-keller-kalmbach-data.pdf>

<https://www.jungheinrich.it/soluzioni/referenze/keller-kalmbach-601406>

<https://media-live2.prod.scw.jungheinrichcloud.com/resource/blob/601546/301b5e7691228cee9e501e9a29bfbf52/referenza-psz-electronic-data.pdf>

<https://www.audi-mediacycenter.com/en/audi-techday-smart-factory-7076/logistics-7083>

<https://www.dematic.com/it-it/downloads-and-resources/case-studies/download/?map=16&id=1692>

<https://www.tgw-group.com/it/case-studies/thomann>

<https://corporate.zalando.com/en/newsroom/news-stories/zalando-strengthens-robotics-its-logistics-centers>

<https://www.techrepublic.com/article/why-a-german-robot-company-says-it-has-an-edge-over-amazon-and-google/#:~:text=TORU%2C%20which%20costs%20%24113%2C000%20per,p lans%20to%20develop%20warehouse%20robots>

<https://corporate.zalando.com/en/newsroom/news-stories/zalando-strengthens-robotics-its-logistics-centers>

<https://www.tgw-group.com/it/case-studies/heinrichsthaler>

<https://www.tgw-group.com/it/case-studies/wiesenhof>

<https://www.automationworld.com/factory/robotics/article/21138274/bmw-outfits-robots-with-artificial-intelligence>

<https://www.tgw-group.com/it/case-studies/conrad>

<https://www.jungheinrich.it/soluzioni/referenze/kaercher-903056>

<https://www.youtube.com/watch?v=LJZ-3ctN96M>

<https://www.dhl.com/global-en/home/press/press-archive/2022/dhl-supply-chain-implements-its-first-european-fully-automated-small-parts-warehouse-with-robot-picking-for-1-2-3-tv.html>

<https://www.retailtouchpoints.com/features/news-briefs/uniqlo-parent-will-invest-885-million-in-warehouse-automation>

<https://www.daifuku.com/solution/casestudy/case007/>

https://www.youtube.com/watch?v=5oBKbSAUIUE&ab_channel=DaifukuGlobalChannel%22D-Tube%21%22"

<https://roboticsandautomationnews.com/2020/02/05/nike-integrates-robots-from-geek-into-its-japan-warehouse/29566/>

<https://www.daifuku.com/solution/casestudy/case002/>

<https://www.daifuku.com/solution/casestudy/case013/>

[https://www.cassioli.it/wp-content/uploads/2021/03/CASE-STUDY-AJINOMOTO-](https://www.cassioli.it/wp-content/uploads/2021/03/CASE-STUDY-AJINOMOTO-ITA.pdf?_gl=1*11vn68r*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjw4uaUBhC8ARIsANUuDjXOkXJA2VzMISjphmD4X55Wmz7WAWsqvNhARydCHTcwcBRsQigxcgaAsykEALw_wcB)

[ITA.pdf?_gl=1*11vn68r*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjw4uaUBhC8ARIsANUuDjXOkXJA2VzMISjphmD4X55Wmz7WAWsqvNhARydCHTcwcBRsQigxcgaAsykEALw_wcB](https://www.cassioli.it/wp-content/uploads/2021/03/CASE-STUDY-AJINOMOTO-ITA.pdf?_gl=1*11vn68r*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjw4uaUBhC8ARIsANUuDjXOkXJA2VzMISjphmD4X55Wmz7WAWsqvNhARydCHTcwcBRsQigxcgaAsykEALw_wcB)

<https://www.cassioli.it/la-multinazionale-giapponese-del-food-and-beverage-ajinomoto-affida-lautomatizzazione-della-pallettizzazione-a-cassioli/>"

<https://www.daifuku.com/solution/casestudy/case001/>

<https://www.ferrettogroup.com/pdfCrea.cfm?idpagina=219&lang=Eng>

<https://www.logiqs.nl/en/bajaj-india/>

<https://www.vanderlande.com/references/brt-bartolini/>

<https://www.ferrettogroup.com/pdfCrea.cfm?idpagina=85&lang=Eng>

<https://www.swisslog.com/it-it/casi-di-successo-e-referenze/casi-di->

[successo/2022/01/barcella-autostore-italy](https://www.ferrettogroup.com/pdfCrea.cfm?idpagina=218&lang=Eng)

<https://www.ferrettogroup.com/pdfCrea.cfm?idpagina=218&lang=Eng>

<https://www.ferrettogroup.com/pdfCrea.cfm?idpagina=188&lang=Eng>

<https://www.jungheinrich.it/soluzioni/referenze/automazione-di-successo-presso-conad-nord-ovest-747026>

https://www.youtube.com/watch?v=afz0oVN6d-M&t=170s&ab_channel=JungheinrichITA

<https://www.ferrettogroup.com/pdfCrea.cfm?idpagina=211&lang=Eng>

<https://www.ferrettogroup.com/pdfCrea.cfm?idpagina=182&lang=Eng>

<https://www.ferrettogroup.com/pdfCrea.cfm?idpagina=255&lang=Eng>

<https://www.ilgiornaledellalogistica.it/news/aziende/logistica-per-il-fashion-a-treccate-si-punta-su-automazione-e-innovazione/>

[https://www.mwpvl.com/html/dematic_multishuttle_review.html#:~:text=It%20is%20important%20to%20note%20that%20this%20information%20is%20based,apiece%20depending%20on%20their%20design."](https://www.mwpvl.com/html/dematic_multishuttle_review.html#:~:text=It%20is%20important%20to%20note%20that%20this%20information%20is%20based,apiece%20depending%20on%20their%20design.)

<https://www.jungheinrich.it/soluzioni/referenze/nutkao-757760>

https://www.youtube.com/watch?v=L_YvSGZjcol&ab_channel=JungheinrichITA

<https://www.jungheinrich.it/soluzioni/referenze/orogel-3-un-eccellenza-europea-823080>

https://www.youtube.com/watch?v=FtFa-XrCtSo&ab_channel=JungheinrichITA

https://www.cassioli.it/wp-content/uploads/2020/11/CASE-STUDY-SAMMONTANA-ITA.pdf?_gl=1*v6ne7g*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjw4uaUBhC8ARIsANUuDjXOkXJA2VzMISjphmD4X55Wmz7WAWsqvNhARydCHTcwcBRsQi-gxcgaAsykEALw_wcB

<https://www.cassioli.it/sammontana-sceglie-cassioli-per-lautomazione-del-suo-nuovo-magazzino/>

<https://www.jungheinrich.it/soluzioni/referenze/fima-carlo-frattini-955070>

https://www.youtube.com/watch?v=Ubm3iy6OMYM&ab_channel=JungheinrichITA

http://www.cassioli.it/wp-content/uploads/2021/11/CASE-STUDY-PALAZZOLI-ITA.pdf?_gl=1*1lyphne*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjw4uaUBhC8ARIsANUuDjXOkXJA2VzMISjphmD4X55Wmz7WAWsqvNhARydCHTcwcBRsQi-gxcgaAsykEALw_wcB

https://www.cassioli.it/wp-content/uploads/2021/03/CASE-STUDY-SACI-ITA.pdf?_gl=1*pzlssy*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjw4uaUBhC8ARIsANUuDjXOkXJA2VzMISjphmD4X55Wmz7WAWsqvNhARydCHTcwcBRsQi-gxcgaAsykEALw_wcB

<https://www.cassioli.it/saci-affida-a-cassioli-la-realizzazione-del-suo-nuovo-magazzino-automatico/>

<https://www.ferrettogroup.com/pdfCrea.cfm?idpagina=252&lang=Eng>

<https://qz.com/1070240/nike-is-investing-in-grabits-robots-which-use-static-electricity-to-put-its-shoes-together/>

<https://www.bila-automation.com/case-stories/bremnes>

<https://www.bila-automation.com/case-stories/dugnaden>

<https://www.bila-automation.com/case-stories/hav-line>

<https://www.bila-automation.com/case-stories/agv/hav-line-automates-production-with-5-agvs>

https://www.youtube.com/watch?v=QXph3VdpLK4&ab_channel=Swisslog

<https://www.swisslog.com/it-it/casi-di-successo-e-referenze/casi-di-successo/2022/04/farveringen-norway>

<https://media-live2.prod.scw.jungheinrichcloud.com/resource/blob/601500/f5250175deee107a1e9476c6727070d6/riferimenti-thyssenkrupp-data.pdf>

<https://www.vanderlande.com/references/udea/>

<https://about.ups.com/sg/en/our-stories/innovation-driven/a-reimagined-warehouse--people--robots--and-sustainable-too-.html>

https://www.youtube.com/watch?v=rcmoVyQr2ME&ab_channel=Swisslog

<https://www.swisslog.com/it-it/casi-di-successo-e-referenze/casi-di-successo/2021/06/arvato-netherlands>

<https://www.systemlogistics.com/ita/main-projects/maspex>

<https://www.logiqs.nl/en/raporal-portugal-as-rs/>

<https://www.jungheinrich.it/soluzioni/referenze/maso-profit-918622>

<https://www.youtube.com/watch?v=6PJrnuh-iQw>

https://www.cassioli.it/wp-content/uploads/2021/03/CASE-STUDY-ARCTIC-ITA.pdf?_gl=1*n36xat*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjw4uaUBhC8ARIsANUuDjXOkXJA2VzMISjphmD4X55Wmz7WAWsqvNhARydCHTcwcBRsQi-gxcgaAsykEALw_wcB

https://www.youtube.com/watch?v=gz8e9qbS3kQ&ab_channel=Vanderlande

https://www.youtube.com/watch?v=cGmsWq4HZiQ&ab_channel=Vanderlande

<https://www.vanderlande.com/references/recio/>

<https://www.tgw-group.com/it/case-studies/ahorramas>

https://www.youtube.com/watch?v=QNF7_GAdZK4

https://www.swisslog.com/it-it/casi-di-successo-e-referenze/casi-di-successo/2019/07/stihl_madrid

http://www.cassioli.it/wp-content/uploads/2022/04/CASE-STUDY-COSENTINO-ITA.pdf?_gl=1*1lyphne*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjw4uaUBhC8ARIsANUuDjXOkXJA2VzMISjphmD4X55Wmz7WAWsqvNhARydCHTcwcBRsQi-gxcgaAsykEALw_wcB

<https://www.bila-automation.com/case-stories/dan-palletiser/gelita>

<https://www.tgw-group.com/it/case-studies/coop>

https://www.youtube.com/watch?v=GIXMFCc4tck&t=6s&ab_channel=TGWLogisticsGroup"

<https://www.systemlogistics.com/ita/main-projects/muller>

<https://www.rmgrouppk.com/media-resources/case-studies/british-sugar/>

<https://www.automationworld.com/communication/article/22080915/british-sugar-factories-of-the-future-4g-private-network>"

<https://blog.geekplus.com/case-studies/asda>

https://www.youtube.com/watch?v=lmKrNxxsAOg&ab_channel=GeekPlus-Logistics%26WarehouseAutomation"

<https://www.mhi.org/media/members/14797/128691717121260798.pdf>

https://www.youtube.com/watch?v=vVF83PsPjSo&ab_channel=CNET

<https://www.cnet.com/tech/services-and-software/boxed-retailer-got-robots-automation-humans-jobs/>

[https://www.supplychaindive.com/news/boxed-speeds-up-automated-fulfillment/525826/#:~:text=Boxed%20developed%20the%20AGV%20hardware,%24100%20million%20in%20order%20volume."](https://www.supplychaindive.com/news/boxed-speeds-up-automated-fulfillment/525826/#:~:text=Boxed%20developed%20the%20AGV%20hardware,%24100%20million%20in%20order%20volume.)

https://www.youtube.com/watch?v=g1AWOvpLLn0&ab_channel=Vanderlande

<https://www.supermarketnews.com/technology/walmart-kicks-automation-25-regional-distribution-centers>

https://www.youtube.com/watch?v=ZBRoXW6YtGI&list=PLJMFeyj6RMjRE80K5bk7I_k_2Y1JJQ_ro&ab_channel=BastianSolutions

<https://www.bastiansolutions.com/resources/case-studies/e-commerce/newegg/>"

<https://www.bastiansolutions.com/resources/case-studies/e-commerce/adoreme/>

https://www.youtube.com/watch?v=nSVJhXpkLM0&list=PLJMFeyj6RMjQ9eDOjV1RyOdU3doAwo5vr&ab_channel=BastianSolutions"

<https://www.vox.com/recode/2019/12/11/20982652/robots-amazon-warehouse-jobs-automation>

https://www.youtube.com/watch?v=Lyf5qwUY2sI&list=PLJMFeyj6RMjT3Dx39LKEPI1eO9SghLmwn&ab_channel=BastianSolutions

<https://www.bastiansolutions.com/resources/case-studies/retail-apparel/dicks-sporting-goods/>

<https://www.bastiansolutions.com/resources/case-studies/e-commerce/puma-indiana/#Key%20Technologies>

https://www.youtube.com/watch?v=OKiAMhv0grM&list=PLJMFeyj6RMjS4CatqZeuhUCuBlrxOc4w6&ab_channel=BastianSolutions

<https://roboticsandautomationnews.com/2021/10/21/geodis-and-bastian-solutions-claim-worlds-highest-autostore-throughput/46765/>

<https://www.bastiansolutions.com/resources/case-studies/industrial-distribution/hercules/>

<https://www.cnn.com/2021/11/04/heres-how-kroger-is-using-robots-to-get-groceries-to-customers-doors.html>

<https://www.jungheinrich.it/soluzioni/referenze/trumpf-918424>

https://www.youtube.com/watch?v=8le6ghE3qgs&feature=emb_title

<https://www.daifuku.com/solution/casestudy/case003/>

Grazia Vicario e Raffaello Levi, Metodi statistici per la sperimentazione, Bologna, Editrice Esculapio, 2008

In-depth: Industry 4.0 2021, Statista Digital Market Outlook, June 2021