
**UNIVERSITÀ DI GENOVA
SCUOLA DI SCIENZE SOCIALI
DIPARTIMENTO DI ECONOMIA**

*Corso di laurea magistrale in Economia e Management
Marittimo e Portuale*



Elaborato scritto per la Prova finale in
Innovation Management

**L'adozione dell'intelligenza artificiale nel settore portuale:
percezione dei benefici e delle barriere all'implementazione
da parte dei terminal manager in Italia**

Docente di riferimento: Nicoletta Buratti
Citadma Francesco Vitellaro

Candidato: Leonardo Rais

**anno accademico
2023/2024**

Indice

I. Abstract	6
II. Introduzione	8
III. Intelligenza Artificiale: definizione e concetti fondamentali	13
III.1. Rete neurale artificiale:	13
III.2. Fuzzy-analytic hierarchy process (FAHP):	14
III.3. Fuzzy Failure Mode and Effects Analysis (FMEA):	15
III.4. Fuzzy Delphi Method:	16
III.5. Algoritmo di ottimizzazione delle particelle (PSO):	16
III.6. Algoritmo di machine learning:	17
III.7. Algoritmo genetico	18
III.8. Sistema di inferenza neuro-fuzzy adattivo (ANFIS):	18
III.9. Metaeuristiche tabù-search:	19
III.10. Decision Support System (DSS)	20
IV. L'IA in ambito portuale: analisi della letteratura:	23
IV.1. Metodologia	23
IV.2. L'IA nel settore marittimo portuale	28
IV.3. Operatori coinvolti nell'introduzione di IA nel sistema porto	34
IV.3.1. I terminalisti.....	34
IV.3.2. Armatori e caricatori	35
IV.3.3. Autorità portuali.....	37
IV.3.4. Gli operatori logistici.....	38
IV.4. Benefici derivanti dall'implementazione di IA nel sistema portuale	40
IV.4.1. La riduzione di costi	40
IV.4.2. La sostenibilità ambientale.....	46
IV.4.3. Aumento di competitività.....	49
IV.4.4. La pianificazione operativa	54
IV.4.5. Il supporto decisionale	58
IV.4.6. L'efficienza energetica	62
IV.4.7. La qualità.....	64
IV.4.8. La sicurezza	69
IV.5. Gli ostacoli all'implementazione dell'IA in ambito portuale	73
IV.5.1. La resistenza al cambiamento	73
IV.5.2. Investimenti ingenti	77
IV.5.3. Cybersecurity	80
IV.5.4. La normativa	82
IV.5.5. La complessità dei sistemi	86
IV.5.6. L'inadeguatezza delle <i>strutture</i>	89
IV.5.7. L'incertezza	93
V. Indagine empirica: opinioni e aspettative dei terminalisti italiani sull'IA	96
V.1. Il questionario	97

V.1.1. Risultati del questionario	99
V.2. Le testimonianze.....	103
V.2.1. I risultati delle interviste.....	104
VI. Conclusioni	109
VII. Bibliografia:	117

I. Abstract

Innovazioni basate sull'applicazione dell'intelligenza artificiale (IA), nelle sue varie forme, si stanno diffondendo in ogni ambito. Non è esclusa dalla diffusione dell'IA anche l'industria marittima, più nello specifico i sistemi portuali ed i relativi operatori. Una caratteristica fondamentale di questo settore è data dal fatto che le attività, oltre ad essere di natura *capital intensive*, consistono nell'offerta di servizi prevalentemente standardizzati, con scarsa possibilità di differenziazione. Ciò induce gli operatori a perseguire prioritariamente un obiettivo di efficienza, che si sostanzia nell'attuazione di strategie competitive di costo. Ciò porta gli operatori ad assumere generalmente riluttanza verso possibili alternative nell'erogazione del servizio. L'avvento dell'intelligenza artificiale, tuttavia, potrebbe rappresentare una possibilità di forte efficientamento delle operazioni e l'inclusione di elementi IA nell'organizzazione aziendale potrebbe imporsi come nuovo standard nel settore. Lo scopo della tesi consiste nel comprendere l'effettiva possibilità di diffusione di tale innovazione nel contesto portuale, dapprima tramite una analisi della letteratura, e successivamente attraverso un confronto fra quanto emerso dall'analisi desk e le percezioni/atteggiamenti di un gruppo selezionato di operatori portuali italiani. L'analisi sul campo è stata condotta attraverso la somministrazione di un questionario volto ad inquadrare la posizione di soggetti operanti nell'ambito portuale rispetto all'introduzione di applicazioni basate sull'IA nelle attività svolte.

Innovations based on the application of artificial intelligence (AI), in its various forms, are spreading across all sectors. The maritime industry is no exception, particularly in the context of port systems and their operators. A fundamental characteristic of this sector is that activities, in addition to being capital-intensive, involve the provision of predominantly standardized services, with limited opportunities for differentiation. This leads operators to prioritize efficiency as a primary objective, which materializes in the implementation of cost competitive strategies. Consequently, operators generally exhibit reluctance towards possible alternatives in service delivery. However, the advent of

artificial intelligence could represent a significant opportunity for enhancing operational efficiency, and the inclusion of AI elements within corporate organization could become a new standard in the sector. The aim of this thesis is to understand the actual potential for the diffusion of such innovation in the port context, first through a literature review, and subsequently through a comparison between the findings from the desk analysis and the perceptions/attitudes of a selected group of Italian port operators. The field analysis was conducted through the administration of a questionnaire designed to assess the position of individuals working in the port sector regarding the introduction of AI-based applications in their activities.

II. Introduzione

La diffusione e l'adozione della tecnologia rappresentano un processo complesso che coinvolge molteplici fattori sociali, economici e culturali. La letteratura scientifica ha ampiamente esplorato questo fenomeno, analizzando gli ostacoli e le resistenze che spesso accompagnano l'introduzione di nuove tecnologie nella società.

Uno dei modelli più influenti per comprendere la diffusione della tecnologia è la "Teoria della diffusione dell'innovazione" di Everett Rogers (1962). Questo modello identifica cinque categorie di adottanti: innovatori, early adopters, maggioranza anticipatrice, maggioranza ritardataria e ritardatari. Ciascun gruppo ha caratteristiche distinte che influenzano la loro propensione ad adottare nuove tecnologie.

La letteratura scientifica ha identificato diversi ostacoli che possono rallentare o impedire l'adozione di nuove tecnologie:

1. Barriere economiche: Costi elevati di implementazione e manutenzione possono scoraggiare l'adozione, soprattutto nelle fasi iniziali.

2. Complessità tecnologica: Tecnologie difficili da comprendere o utilizzare possono incontrare resistenza da parte degli utenti potenziali.

3. Inerzia organizzativa: Le organizzazioni possono essere riluttanti a cambiare processi e sistemi consolidati.

4. Preoccupazioni sulla privacy e sicurezza: Soprattutto nel caso di tecnologie digitali, le preoccupazioni sulla protezione dei dati personali possono rappresentare un ostacolo significativo

Le resistenze all'adozione tecnologica spesso hanno radici profonde nella cultura e nella società. Alcune persone o gruppi possono essere intrinsecamente scettici nei confronti del cambiamento tecnologico. In aggiunta a ciò, le generazioni più anziane possono trovare più difficile adattarsi alle nuove tecnologie rispetto alle generazioni più giovani, ma di maggiore rilevanza per il tema dell'IA in ambito portuale è timore che la tecnologia possa sostituire i lavoratori umani generando resistenza in determinati settori.

A fronte di tali resistenze, la ricerca ha identificato diverse strategie per facilitare l'adozione tecnologica, tra cui l'educazione e formazione (programmi di formazione mirati possono aiutare a superare le barriere legate alla complessità tecnologica), il coinvolgimento degli stakeholder (includere gli utenti finali nel processo di sviluppo e implementazione può aumentare l'accettazione), la prova dei benefici (una buona

comunicazione dei vantaggi della nuova tecnologia può motivare l'adozione) ed infine politiche di supporto (incentivi governativi e politiche favorevoli possono accelerare l'adozione in settori chiave).

Le operazioni portuali, nel tempo, sono cresciute esponenzialmente in senso di unità gestite e mezzi (fisici ed informatici) utilizzati portando le industrie marittime ad affrontare sfide sempre più difficili utilizzando approcci risolutivi che non sempre sono in grado di offrire soluzioni efficienti. Un aspetto di particolare complessità gestionale riguarda il crescente ammontare di dati che i soggetti operanti nel marittimo devono elaborare ed interpretare, motivo per cui l'introduzione di sistemi di supporto intelligenti hanno colto l'attenzione del settore.

I porti costituiscono un tassello fondamentale per il quadro dell'economia mondiale, in quanto assumono il ruolo di porte di accesso al mercato globale del commercio internazionale. Nonostante il commercio internazionale dipenda dallo stato di salute dell'economia globale, si è assistito in anni recenti ad una crescita più accelerata rispetto a quest'ultima soprattutto contestualmente all'instaurazione della globalizzazione. Attualmente i due tassi di crescita sono tornati a livelli simili, ma osservando l'andamento storico ci si può aspettare un'entità di traffico sempre maggiore nel corso del tempo (Fig. 1.1).

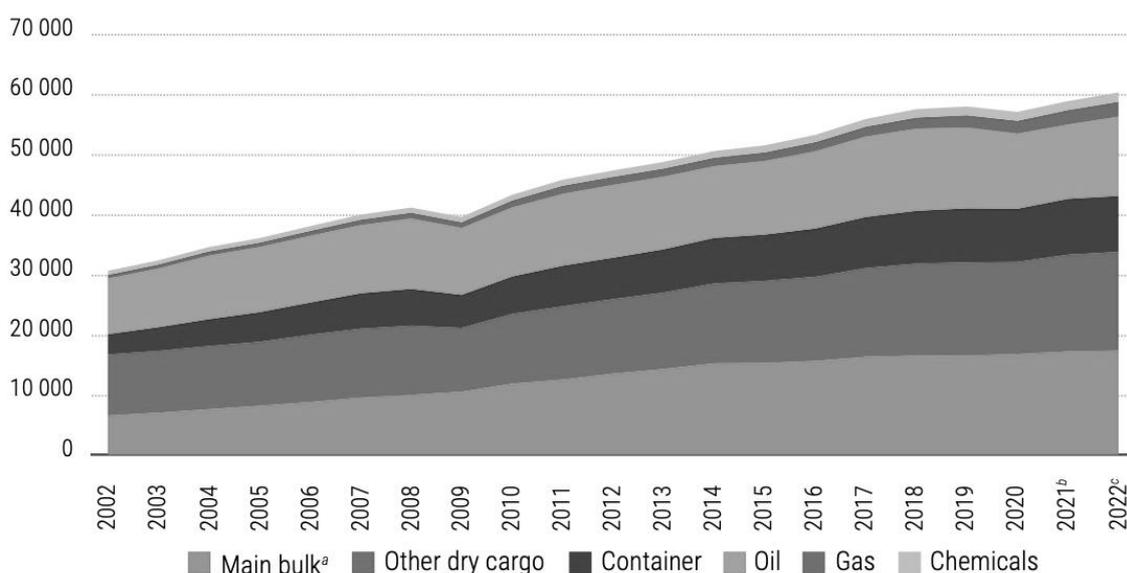
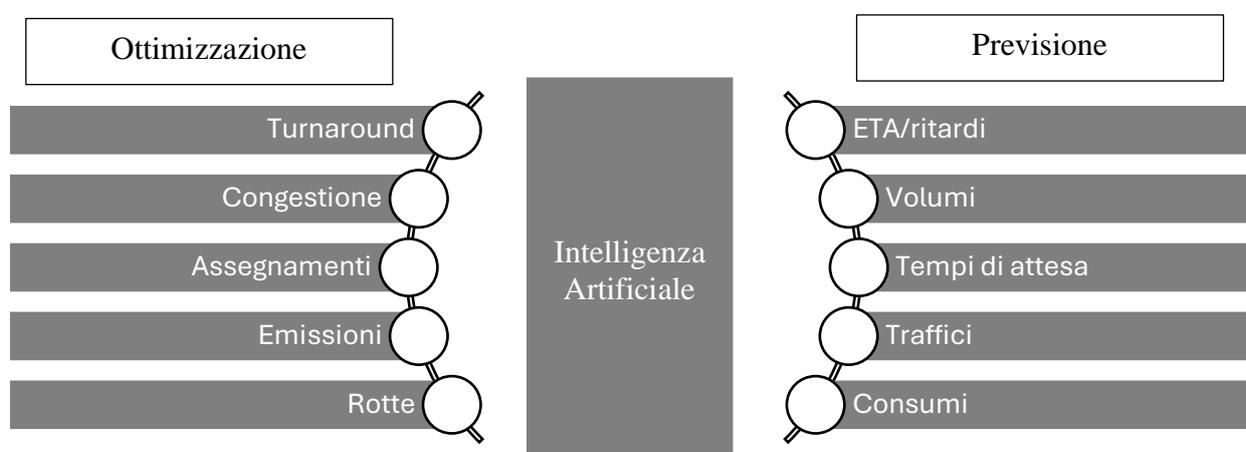


Fig. 1.1 – Commercio internazionale per miliardi di tonnellate-miglia (UNCTAD maritime review 2022)

Per questo motivo l'adozione di tecnologie in grado di assorbire ed elaborare la relativa mole di dati diventa un aspetto di fondamentale importanza per la sopravvivenza sul mercato degli operatori. Il vantaggio dell'intelligenza artificiale in questo senso consta del fatto che non sono previste risorse ed infrastrutture fisiche aggiuntive. Inoltre, l'IA presenta due caratteristiche intrinseche di grande vantaggio per l'industria: la capacità di ottimizzazione e la capacità di previsione (Agarwal et al. 2018). Per gli stakeholder questo binomio misura l'efficienza di un sistema portuale e ciascuno dei due elementi trova applicazione in una serie di ambiti come da Fig. 1.2:



*Fig. 1.2 – Capacità e applicazione dell'IA nelle attività portuali
Author's elaboration*

La capacità di previsione consiste principalmente nell'individuare possibili rischi e/o problemi ed assistere conseguentemente gli stakeholder nella considerazione di suddetti elementi in fase di pianificazione. Dall'altro lato l'ottimizzazione è funzionale rispetto al massimo sfruttamento degli asset, un obiettivo essenziale in un business capital intensive come quello portuale (Farzadmehr et al. 2023).

Come si andrà ad analizzare in dettaglio nei successivi capitoli, l'IA trova, per la sua natura altamente versatile, potenziale applicazione in numerosi ambiti. La tecnologia, a livello di settore portuale, si trova attualmente in una fase sperimentale, in cui ricercatori, studiosi e altri stakeholder sviluppano forme diverse di intelligenze artificiali volte alla risoluzione di problemi di varia tipologia. Anche quando lo scopo finale dell'IA è il medesimo, gli strumenti operabili possono presentare grosse differenze sostanziali.

Nello studio condotto emergono, per esempio, autori che propongono strumenti di intelligenza artificiale pensati per l'aumento della competitività del singolo terminal puntando sull'ottimizzazione dei tempi di sosta in banchina (Pratap et al. 2017), altri invece che sottolineano la possibilità di migliorare il customer service e la qualità percepita del servizio tramite l'umanizzazione dei *chatbot* (Schanke et al. 2021). Continuando a titolo esemplificativo, un ulteriore ambito applicativo di forte interesse consiste nella pianificazione operativa. Anche in questo caso, i metodi per il miglioramento di tale attività non sono univoci, potendo agire sullo scheduling delle navi da servire (Lokuge et al. 2007) così come sull'ottima distribuzione dei container a piazzale (Maldonado et al. 2019). L'approccio attuale all'adozione dell'IA è dunque vario e diversificato; , alcuni ambiti di applicazione ricevono maggiore attenzione rispetto ad altri, ma ciò che risulta certo è il fatto che i terminal si trovino al centro della diffusione dell'intelligenza artificiale in contesto portuale. Gli articoli scientifici, infatti, vedono il terminal come una fonte di potenziali applicazioni di diversa natura, poiché rappresentano il cuore del sistema portuale, il portale tra *inland* e trasporto marittimo quale anello essenziale della supply chain. Il terminal è dunque il soggetto della ricerca, motivo per cui le testimonianze raccolte in merito al tema dell'IA in contesto portuale derivano dalla combinazione di questionario ed intervista, ai quali vengono sottoposti diversi terminalisti appartenenti ai sistemi portuali italiani.

Ma se i benefici dell'implementazione di intelligenze artificiali nel porto sono così evidenti è opportuno cercare di capire il motivo per cui ciò non sia ancora una realtà diffusa. Lo scopo della ricerca è dunque quello di indagare quali elementi favoriscono e quali limitano l'effettivo utilizzo di IA da parte degli operatori del settore marittimo. Le due domande di fondo su cui si fonda la tesi sono perciò:

1. Quali sono i benefici e le barriere all'implementazione dell'intelligenza artificiale secondo la letteratura scientifica?
2. Qual è la percezione e il livello di consapevolezza dei terminal manager italiani riguardo a questi aspetti?

La tesi è strutturata in modo da garantire un'analisi approfondita e sistematica del tema, combinando un esame teorico rigoroso con un'indagine empirica sul campo. Si

parte dalla descrizione della metodologia di ricerca, dove vengono presentati gli strumenti e le tecniche adottate per l'elaborazione e l'interpretazione delle informazioni raccolte. Questo approccio è stato scelto per rispondere alle domande di ricerca fondamentali: Quali applicazioni dell'intelligenza artificiale trovano impiego nei terminal portuali? Chi sono gli attori coinvolti? Quali sono i principali vantaggi e le criticità associate a queste implementazioni? La prima parte della ricerca si concentra sull'analisi della letteratura, attraverso la quale sono state identificate le principali tecnologie di intelligenza artificiale adottate, gli operatori interessati, gli ambiti di applicazione e le relative opportunità e sfide. L'obiettivo di questa fase è stato costruire una base teorica solida e sistematizzare le conoscenze già esistenti, ponendo le basi per un confronto diretto con la realtà operativa. Successivamente, per integrare e verificare i risultati emersi dall'analisi teorica, si è ricorso a un duplice approccio empirico. Da un lato, è stato elaborato un questionario strutturato, mirato a raccogliere dati e opinioni dagli operatori del settore portuale. Questo strumento è stato progettato per rilevare le percezioni degli intervistati in relazione agli ambiti di applicazione e ai risultati pratici dell'adozione dell'IA. Dall'altro lato, sono state condotte interviste dirette con terminalisti appartenenti al sistema portuale del Mar Ligure Occidentale. Questi colloqui hanno permesso di approfondire ulteriormente i dati raccolti tramite il questionario, fornendo spunti qualitativi e dettagli pratici sulle sfide e sulle opportunità osservate direttamente dagli operatori.

Infine, i dati raccolti tramite il questionario e le interviste vengono analizzati e commentati, mettendoli in relazione con la letteratura. Questo approccio consente non solo di verificare la coerenza tra teoria e pratica, ma anche di evidenziare eventuali divergenze, offrendo una panoramica completa e articolata sull'argomento trattato. La tesi si conclude con una riflessione critica che sintetizza i risultati ottenuti, fornendo risposte esaustive alle domande di ricerca iniziali e proponendo spunti per future indagini o applicazioni nel settore.

III. Intelligenza Artificiale: definizione e concetti fondamentali

L'intelligenza artificiale è un campo dell'informatica che si occupa della creazione di sistemi e macchine in grado di eseguire compiti che richiedono intelligenza umana, come l'apprendimento, il ragionamento, la percezione, la comprensione del linguaggio naturale e la capacità di prendere decisioni. L'IA si avvale di algoritmi e modelli computazionali per simulare le funzioni cognitive associate all'intelligenza umana e per eseguire compiti complessi in modo autonomo o semi-autonomo. È un fenomeno in continua evoluzione, ma generalmente coinvolge macchine per trovare informazioni rilevanti in grandi quantità di dati ed è capace di eseguire compiti ripetitivi con senza la necessità di una costante guida umana (Carrozza et al. 2019). Il funzionamento è determinato dal tipo di algoritmo sottostante, il quale, a seconda dei casi, può presentare caratteristiche diverse. Nella letteratura analizzata il principio di funzionamento dell'IA studiata è tipicamente descritto in una sezione preliminare prima della presentazione del caso di studio e, per quanto numerosi siano i possibili algoritmi utilizzabili, alcuni compaiono con maggiore frequenza.

III.1. Rete neurale artificiale:

La rete neurale artificiale (RNA) è un sistema di elaborazione dell'informazione ispirato al funzionamento del cervello umano. È composta da unità di calcolo, chiamate neuroni artificiali, che sono interconnesse tra loro attraverso collegamenti sinaptici. Questi neuroni elaborano l'informazione in modo parallelo e distribuito, e le connessioni sinaptiche possono modificare il loro peso in base a un processo di apprendimento, che permette alla rete di adattarsi e migliorare le sue prestazioni in compiti specifici. Le RNA sono in grado di apprendere da esempi e di generalizzare da dati precedentemente non visti, rendendole utili in una varietà di applicazioni. Un primo vantaggio nell'utilizzo delle RNA è l'apprendimento automatico: Le RNA sono in grado di apprendere da dati ed esempi, senza la necessità di essere programmate esplicitamente per ogni singola regola o procedura. Questo permette loro di adattarsi a nuovi dati e di migliorare le loro prestazioni nel tempo. Dopo l'addestramento, le RNA possono generalizzare da dati non visti in precedenza, applicando le conoscenze acquisite a nuovi casi. Rispetto ai processi cognitivi umani, però, le RNA sono in grado di elaborare l'informazione in modo

parallelo, sfruttando l'interconnessione tra i neuroni artificiali per processare più input contemporaneamente (M. Gori 2003). La caratteristica dell'adattabilità, riuscire ad adattarsi a cambiamenti nell'ambiente o nei dati di input, rendendole flessibili e compatibili con situazioni dinamiche, rende le IA basate sulle RNA particolarmente utili in un contesto volatile come quello marittimo.

III.2. Fuzzy-analytic hierarchy process (FAHP):

Il Fuzzy Analytic Hierarchy Process è un'estensione del metodo Analytic Hierarchy Process (AHP) che integra la teoria dei set fuzzy¹ per rappresentare in modo più realistico i giudizi e le preferenze umane, che sono spesso vaghi e incerti. L'AHP è una tecnica di supporto alla decisione che aiuta i decisori a selezionare la migliore alternativa tra diverse opzioni, valutando vari criteri spesso in conflitto tra loro. Il FAHP utilizza numeri fuzzy per rappresentare le preferenze umane nelle matrici di confronto, permettendo di catturare meglio l'incertezza e l'ambiguità intrinseche nei processi decisionali. È il metodo migliore per la simulazione di ambienti incerti come quelli connessi ai traffici marittimi, ma contemporaneamente permette un buon grado di flessibilità nell'espressione delle preferenze: I decisori possono esprimere le loro preferenze in termini linguistici, come "molto importante", "abbastanza importante", "poco importante", tradotti poi in numeri fuzzy. Questo approccio è più intuitivo e naturale per soggetti con capacità informatiche moderate (F. Ahmed et al. 2018).

¹ Set fuzzy: Sono un concetto introdotto da Lotfi Zadeh nel 1965 come estensione degli insiemi classici (o insiemi chiari) per gestire l'incertezza e la vaghezza nel ragionamento e nella classificazione. In un insieme classico, un elemento appartiene o non appartiene all'insieme in modo assoluto, senza sfumature intermedie. Al contrario, in un insieme fuzzy, un elemento può appartenere parzialmente all'insieme, con un grado di appartenenza che varia tra 0 e 1. Mentre in un insieme classico la funzione di appartenenza è binaria (0 o 1), in un insieme fuzzy la funzione di appartenenza può assumere valori reali compresi tra 0 e 1, dove 0 indica che l'elemento non appartiene all'insieme, 1 indica che l'elemento appartiene completamente all'insieme, e i valori intermedi indicano un grado parziale di appartenenza (F. Ahmed et al. 2018)

III.3. Fuzzy Failure Mode and Effects Analysis (FMEA):

Il fuzzy FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) è una metodologia che integra la logica fuzzy con la tradizionale tecnica FMEA per migliorare l'analisi e la gestione dei rischi associati ai fallimenti potenziali di un processo. La logica fuzzy permette di gestire l'incertezza e l'ambiguità che spesso caratterizzano le valutazioni di rischio, fornendo un approccio più flessibile e realistico rispetto all'FMEA tradizionale. Nell'FMEA tradizionale, i rischi vengono valutati attraverso il calcolo del Risk Priority Number (RPN), che è il prodotto della probabilità di occorrenza, della gravità del fallimento e della probabilità di non rilevamento. Tuttavia, questo approccio soffre di alcune criticità, come l'assunzione di un peso uguale per tutti i fattori e la presenza di numeri RPN duplicati che possono portare a un'imprecisa valutazione del rischio. Il fuzzy FMEA utilizza la logica fuzzy per assegnare valori di appartenenza a variabili linguistiche, che possono assumere valori compresi tra 0 e 1, permettendo così di quantificare il grado di verità di una dichiarazione in modo più sfumato. Questo approccio permette di considerare la relativa importanza dei diversi fattori e di gestire meglio l'incertezza nelle valutazioni di rischio (*Kumru et al. 2012*).

Rispetto al contesto studiato alcune caratteristiche di suddetto metodo sono particolarmente vantaggiose. Oltre ad un'agevole gestione dell'incertezza e della valutazione del rischio, il fuzzy FMEA utilizza variabili linguistiche e funzioni di appartenenza tali da consentire valutazioni che meglio rispecchiano la realtà sfumata del rischio. A differenza dell'FMEA tradizionale, che assume che tutti i fattori (probabilità di occorrenza, gravità e probabilità di non rilevamento) abbiano lo stesso peso, il fuzzy FMEA permette di assegnare pesi relativi diversi a questi fattori, riflettendo meglio la loro importanza relativa in situazioni pratiche. Rispetto all'ambiente marittimo, dove la rilevanza dei ruoli knowledge intensive è in crescita, il fuzzy FEMA si presta all'applicazione della conoscenza e l'esperienza degli esperti attraverso regole fuzzy, migliorando la qualità delle valutazioni di rischio. Le relative tecniche di inferenza fuzzy possono incorporare la conoscenza umana/esperta, permettendo di descrivere l'informazione con affermazioni anche vaghe e imprecise durante il processo di modellazione.

III.4. Fuzzy Delphi Method:

Il Fuzzy Delphi Method (FDM) è una versione modificata e migliorata del classico Delphi Method (DM), che integra la teoria fuzzy con il DM per gestire meglio l'informazione vaga e le preferenze linguistiche umane nella presa di decisioni. Il FDM è stato sviluppato per superare le imperfezioni del DM tradizionale, come la bassa convergenza dei risultati, la perdita di informazioni importanti e la durata prolungata delle indagini. Il processo FDM si articola in quattro fasi: preparazione dell'input, applicazione per la selezione, applicazione per la previsione e decisione finale. Un evidente vantaggio nell'utilizzo di questo metodo è l'efficienza in termini di tempo e di costi, poiché richiede un numero ridotto di esperti per generare risultati ragionevoli e obiettivi e non richiede quindi l'intervento di numerosi soggetti competenti per la gestione dello stesso. Un difetto fondamentale, tuttavia, consta nel fatto che l'FDM presenta anche determinate criticità e sfide, come la necessità di un rafforzamento teorico e metodologico e la mancanza di prove empiriche che dimostrino in modo definitivo la sua superiorità rispetto al DM tradizionale (*M. Saffie et al. 2013*).

III.5. Algoritmo di ottimizzazione delle particelle (PSO):

Il Particle Swarm Optimization (PSO) è un algoritmo di ottimizzazione stocastica ispirato al comportamento collettivo di sistemi di agenti (es. sciami di api o banchi di pesci). Questo modello particellare simula dinamiche collettive per trovare soluzioni ottimali a problemi di ottimizzazione. Le particelle, che rappresentano gli agenti, si muovono in uno spazio di ricerca multidimensionale seguendo regole di movimento che tengono conto della propria migliore posizione trovata in precedenza e delle migliori posizioni trovate dalle altre particelle con cui comunicano. L'obiettivo è quello di minimizzare (o massimizzare) una funzione obiettivo attraverso un processo di apprendimento sociale e cognitivo. Il PSO è stato proposto da *Eberhart e Kennedy* nel 1995 e da allora ha subito numerose modifiche e miglioramenti per garantirne la convergenza e l'efficacia in una varietà di problemi di ottimizzazione. Vantaggi nell'utilizzo del metodo consistono in

intuitività, semplicità ed efficienza computazionale. Il PSO è relativamente facile da comprendere e implementare, grazie alla sua rappresentazione intuitiva e al numero limitato di parametri regolabili. Inoltre, l'algoritmo è computazionalmente efficiente, il che lo rende adatto per problemi complessi che richiedono una ricerca di soluzioni ottimali con una certa approssimazione (*M. Trapani 2021*). La natura intrinsecamente parallela del PSO lo rende adatto per l'implementazione su sistemi multicore o cluster di computer, migliorandone ulteriormente l'efficienza soprattutto in sistemi operanti in compresenza di una serie eterogenea di attori come il porto.

III.6. Algoritmo di machine learning:

Il machine learning (ML) è un campo dell'intelligenza artificiale che si occupa dello sviluppo di algoritmi e tecniche che consentono ai computer di apprendere e migliorare le prestazioni in base all'esperienza, senza essere esplicitamente programmati per compiti specifici. In altre parole, il machine learning permette ai sistemi di analizzare dati e di riconoscere modelli per fare previsioni o decisioni senza l'intervento umano diretto. È il principio di funzionamento alla base di molte applicazioni moderne, come la visione artificiale, il riconoscimento vocale, la traduzione automatica e i sistemi di raccomandazione. Oltre all'apprendimento automatico e alla capacità di adattarsi a nuovi dati e a cambiamenti nell'ambiente (migliorando le loro prestazioni nel tempo senza la necessità di una riconfigurazione manuale), il machine learning è caratterizzato da una rapida evoluzione che incorpora continuamente nuove tecniche e algoritmi, spingendo i limiti di ciò che è possibile con l'intelligenza artificiale (*G. Sanguinetti 2020*).

N.B. “Algoritmo di Machine Learning” non indica un algoritmo specifico. È incluso però nei tipi di intelligenza artificiale, poiché nella letteratura analizzata, in molti casi, lo scenario studiato è di tipo ipotetico, tale da considerare i benefici che il machine learning nelle sue caratteristiche essenziali può apportare. Un concetto analogo riguarda i casi di applicazione di “Decision Support Systems”.

III.7. Algoritmo genetico

Un algoritmo genetico (GA) è un tipo di algoritmo ispirato ai processi dell'evoluzione biologica, che viene utilizzato per risolvere problemi e modellare sistemi evolutivi. I GA operano su una popolazione di cromosomi, che rappresentano possibili soluzioni a un problema, e utilizzano operatori ispirati alla genetica come la selezione, il crossover e la mutazione per generare nuove soluzioni. La selezione favorisce i cromosomi più adatti, il crossover scambia parti di due cromosomi e la mutazione introduce casualità nelle soluzioni. I GA sono caratterizzati da una ricerca parallela e sono in grado di esplorare efficacemente vasti spazi di soluzioni alla ricerca di quelle con la migliore adattabilità (*M. Mitchell 1995*). Poiché i GA non richiedono condizioni iniziali specifiche o ipotesi sul problema da risolvere, sono in grado di gestire problemi per i quali altre tecniche di ottimizzazione teorizzate finora potrebbero non essere applicabili o efficaci. Infatti, attraverso l'operatore di mutazione e il processo di ricombinazione, i GA possono generare nuove soluzioni innovative che potrebbero non essere considerate dalle altre tecniche di ottimizzazione. A favore dell'utilizzo dei GA vi è infine la sperimentazione effettuata fino ad oggi; sono stati utilizzati con successo in una varietà di applicazioni complesse e si può dunque contare su prove empiriche di successo.

III.8. Sistema di inferenza neuro-fuzzy adattivo (ANFIS):

L'architettura ANFIS è composta da un numero di “strati”, ognuno dei quali esegue una funzione specifica nel processo di inferenza fuzzy. Questi strati includono:

1. Strato di ingresso: riceve i segnali di input e calcola il grado di appartenenza degli input alle funzioni di appartenenza (membership functions, MFs).
2. Strato di prodotto: calcola il prodotto delle appartenenze per ogni regola.
3. Strato di normalizzazione: normalizza i segnali di attivazione delle regole.
4. Strato di conseguenza: calcola l'output di ogni regola come una funzione lineare o costante degli input.
5. Strato di “de-fuzzificazione”: combina gli output delle regole per produrre l'output finale del sistema (*P. Melin et al. 2011*).

Questo modello ha dimostrato di poter raggiungere prestazioni elevate in una varietà di applicazioni, spesso superando altri modelli di reti neurali e approcci statistici standard. È in grado di essere integrato con altri sistemi di controllo e di elaborazione delle informazioni, grazie alla sua struttura modulare e alla sua capacità di interfacciarsi con altri tipi di dati e sistemi. Un significativo vantaggio è dato inoltre dal fatto che l'architettura ANFIS può essere scalata per gestire problemi di dimensioni diverse, dal semplice al complesso, senza cambiamenti sostanziali nella struttura di base. Insieme alle caratteristiche tipiche degli altri sistemi di IA, ovvero adattabilità e flessibilità, questi punti di forza rendono l'ANFIS uno strumento potente per l'analisi e la modellazione di sistemi complessi in diversi campi, come l'automazione industriale, il controllo di sistemi energetici, la previsione di serie temporali, e molti altri. Si presta quindi particolarmente all'implementazione nel contesto portuale.

III.9. Metaeuristiche tabù-search:

Le metaeuristiche consistono in algoritmi di ottimizzazione progettati per trovare soluzioni approssimate a problemi eccessivamente complessi da essere risolti in tempi ragionevoli. Queste tecniche sono in grado di gestire problemi di grandi dimensioni con molteplici obiettivi e sono particolarmente utili quando i problemi affrontati prevedono ottimizzazione combinatoria, dove il numero di possibili soluzioni cresce esponenzialmente con la dimensione del problema. La ricerca tabù è una metaeuristica che esplora lo spazio delle soluzioni di un problema di ottimizzazione attraverso un processo iterativo. A ogni iterazione, seleziona una soluzione vicina a quella corrente (chiamata "vicino") e la valuta in relazione ad una funzione obiettivo. Per evitare di rimanere intrappolati in minimi locali o cicli non produttivi, la ricerca tabù mantiene una lista di mosse recenti che sono considerate "tabù" e quindi non possono essere ripetute oltre un certo numero di iterazioni. Si tratta di iterazioni, che rispetto alle regole base dell'algoritmo dovrebbero essere escluse. Questo meccanismo permette all'algoritmo di esplorare aree dello spazio delle soluzioni che altrimenti potrebbero essere trascurate. La ricerca tabù utilizza anche un criterio di aspirazione che permette di ignorare la regola tabù se un'iterazione deviante porta a una soluzione migliore di quelle finora trovate.

Inoltre, può includere meccanismi di intensificazione e diversificazione per migliorare la qualità delle soluzioni e per esplorare ulteriormente lo spazio delle soluzioni (R. Caballero et al. 2005).

III.10. Decision Support System (DSS)

Decision Support Systems (DSS), o Sistemi di Supporto alle Decisioni, sono definibili come sistemi informativi intelligenti, il cui scopo è quello di migliorare il processo decisionale attraverso l'offerta di criteri per la valutazione di alternative o per la giustificazione di decisioni. Questi sistemi supportano direttamente i decisori, fornendo un'interazione user-friendly, veloce ed efficiente con differenti sistemi. I DSS sono caratterizzati dalla capacità di acquisire, rappresentare e strutturare la conoscenza dell'ambito di studio e di separare i dati dai modelli per rielaborarli per la generazione di prototipi. I DSS forniscono conoscenza esperta specifica del dominio di interesse e possono essere utilizzati efficacemente per la diagnosi, pianificazione, gestione e ottimizzazione di operazioni. Il decisore non è assistito nella mera risoluzione di un problema ma anche nella formulazione iniziale dello stesso partendo dall'espressione delle necessità ed obiettivi da soddisfare. Sono strumenti progettati per integrare diverse fonti di informazione, rappresentazioni o modelli del problema, e tecniche di risoluzione differenti al fine di supportare decisioni strutturate e di migliorare l'efficacia delle operazioni (U. Cortés et al. 2000).

È da notare che, come nel caso degli algoritmi di machine learning, il "DSS" non si riferisce a tecniche specifiche, bensì si tratta di un concetto piuttosto generico. È incluso nel capitolo delle tecniche di IA, poiché nella maggior parte dei casi di letteratura gli autori non si occupano del funzionamento sottostante all'IA studiata, ma privilegiano il solo studio degli effetti sulla gestione delle attività sin scenari inclusivi del supporto di sistemi intelligenti in senso generale.

Una volta definiti i tipi di intelligenza artificiale proposti dalla letteratura è opportuno osservare con quale frequenza essi compaiano nello studio dei sistemi portuali (Fig. 3.1):

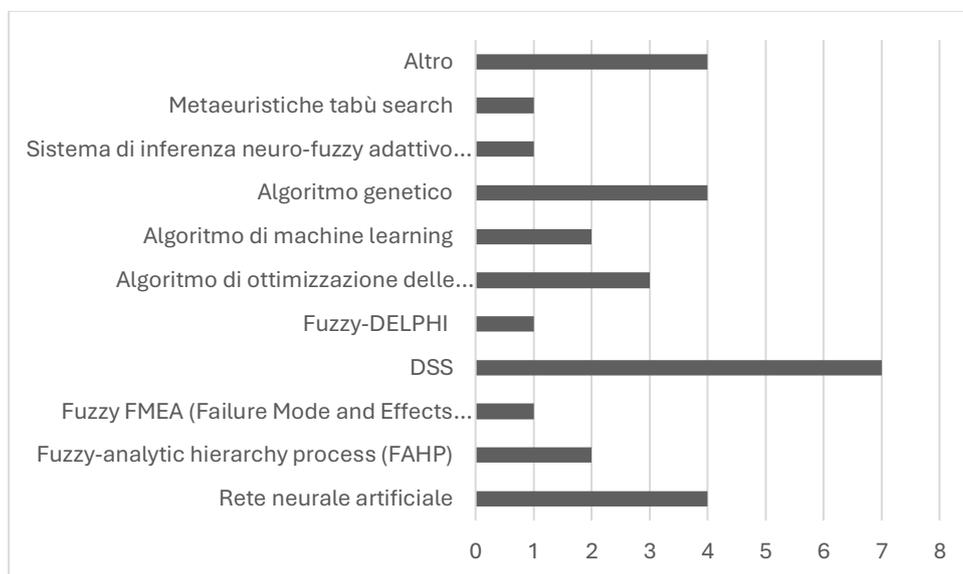


Fig. 3.1. – Frequenza di studio nella letteratura dei tipi di IA applicata al contesto portuale

Ciò che appare evidente dalla letteratura è che pare esservi un rapporto inverso tra grado di specificità nell'IA osservata e quantità di studi effettuati. Si nota infatti come IA di tipo più stringente (metaeuristiche, sistemi neurofuzzy, FMEA ecc.) ottengano meno attenzione dagli autori rispetto ad altre intelligenze più generiche come quelle incluse nei possibili decision support systems. Questo fenomeno è da associare ad alcuni probabili motivi sottostanti alla ricerca. In primo luogo, è possibile che evitando di vincolare il caso di studio proposto dal singolo articolo ad un tipo eccessivamente stringente di IA, l'applicabilità dei risultati presenta maggiore ampiezza e possono dunque essere di utilità anche per altri casi o generalmente altri ambiti. Un ulteriore motivo che possa giustificare questo fenomeno ha a che fare con il basso grado di maturità della tecnologia. Considerando il fatto che il boom di diffusione di IA simili e dell'affermazione sul mercato di un possibile standard è una novità di pochi anni, gli autori, i cui studi risalgono in media a 10 anni prima dell'attuale "neo-avvento" dell'IA, non potendo conoscere le tendenze che caratterizzano il contesto attuale, hanno preferito occuparsi del tema con

approcci più ampi a fronte dell'incertezza dell'effettivo sviluppo sul mercato di tale tecnologia.

Dal lato opposto vi sono casi che rientrano nel di tipo di IA sotto la voce "Altro". Questa voce raggruppa tutti i casi di studio in cui l'intelligenza artificiale esaminata viene concepita in maniera personalizzata rispetto al problema affrontato; si tratta infatti di intelligenze sviluppate ad hoc pensate per la risoluzione dello specifico problema. L'applicabilità ad altri ambiti si limita dunque a casi analoghi, che presentano premesse molto simili o identiche.

IV. L'IA in ambito portuale: analisi della letteratura:

Il primo obiettivo della tesi è quello di comprendere come la letteratura definisce e inquadra l'intelligenza artificiale nell'ambito portuale. In realtà il concetto di IA è noto già da decenni e gli algoritmi che ne determinano il funzionamento tutt'ora sono stati teorizzati e in parte applicati a partire dal secolo scorso. Sul periodo e sul fondatore dell'IA vi è ampio dibattito, diverse fonti allocano la nascita dell'IA al 1956 a seguito del seminario estivo tenutosi presso il Dartmouth College di Hanover nel New Hampshire, anno in cui la disciplina viene fondata programmaticamente. Ciononostante, negli ultimi anni si è assistito ad un neo-avvento dell'IA e sempre più frequentemente vengono immesse sul mercato nuove generazioni gradualmente più evolute. Proprio per questo motivo il numero di articoli che riguardano il tema presenta un andamento esponenziale nel corso degli anni più recenti.

IV.1. Metodologia

La principale fonte utilizzata per il reperimento della letteratura è "[Scopus.com](https://www.scopus.com)". Sono stati innanzitutto individuati termini chiave da combinare in una stringa di ricerca, per la quale sono stati effettuati alcuni tentativi. La stringa che ha prodotto il risultato più soddisfacente contiene i termini "ai – artificial intelligence – robotic – port – dock – harbour – terminal – maritime logistics – shipping", combinati nel seguente modo:

```
TITLE-ABS-KEY ( ( "AI" OR "artificial intelligence" OR "robotic*" ) AND ( "port"
OR "Dock" OR "Harbor" OR "Harbour" OR "terminal" OR "maritime logistics" OR
"shipping" ) ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE ,
"English" )
```

I risultati così ottenuti costituiscono un insieme di 5.994 articoli. Per garantire una buona qualità dei contenuti ed escludere gli articoli ritenuti qualitativamente inferiori dalla comunità scientifica, l'insieme viene filtrato

secondo il criterio dell'ABS rating². Così facendo si prendono in esame solamente articoli supportati da pubblicazioni ritenute qualitativamente valide, il che garantisce nella ricerca una serie di vantaggi: oltre alla qualità e rilevanza dei papers giustificata dalle numerose revisioni, gli articoli che ne emergono hanno un impatto accademico maggiore e rappresentano fonti affidabili. Ciò significa che se il singolo articolo deriva da una rivista scientifica, la cui valutazione ABS, sulla base della relativa scala di valutazione da 1 a 5, è inferiore a "3 su 5", non viene considerato per l'analisi della letteratura. Il campione si riduce così significativamente a 157 risultati. A seguito di ciò si analizzano titolo e contenuto dell'abstract di ciascun paper per eliminare gli articoli non inerenti al tema studiato; in questo passaggio è opportuno un approccio inclusivo per non rischiare di scartare contenuti validi, il cui titolo e/o abstract risulta deviante. Infine, vengono analizzati nel dettaglio gli articoli nei rispettivi contenuti, facendo emergere quelli non riguardanti propriamente il tema di ricerca. La parte di letteratura che non riguarda propriamente il tema dell'intelligenza artificiale in applicazione alle strutture portuali o connessi, si rivela essere, dopo l'analisi dei contenuti, piuttosto ridotta, costituendo così un campione finale di 33 articoli (il basso numero di risultati validi è giustificato dallo stato embrionale in cui si trova attualmente l'innovazione dell'IA nel contesto portuale). Il processo ed i relativi risultati intermedi sono riportati in *Fig. 4.1*:

² L'ABS rating fornito dall'Academic Journal Guide si basa sulla revisione tra pari, sui giudizi editoriali e di esperti a seguito della valutazione di centinaia di pubblicazioni, sono supportate da informazioni statistiche relative alle citazioni degli articoli.

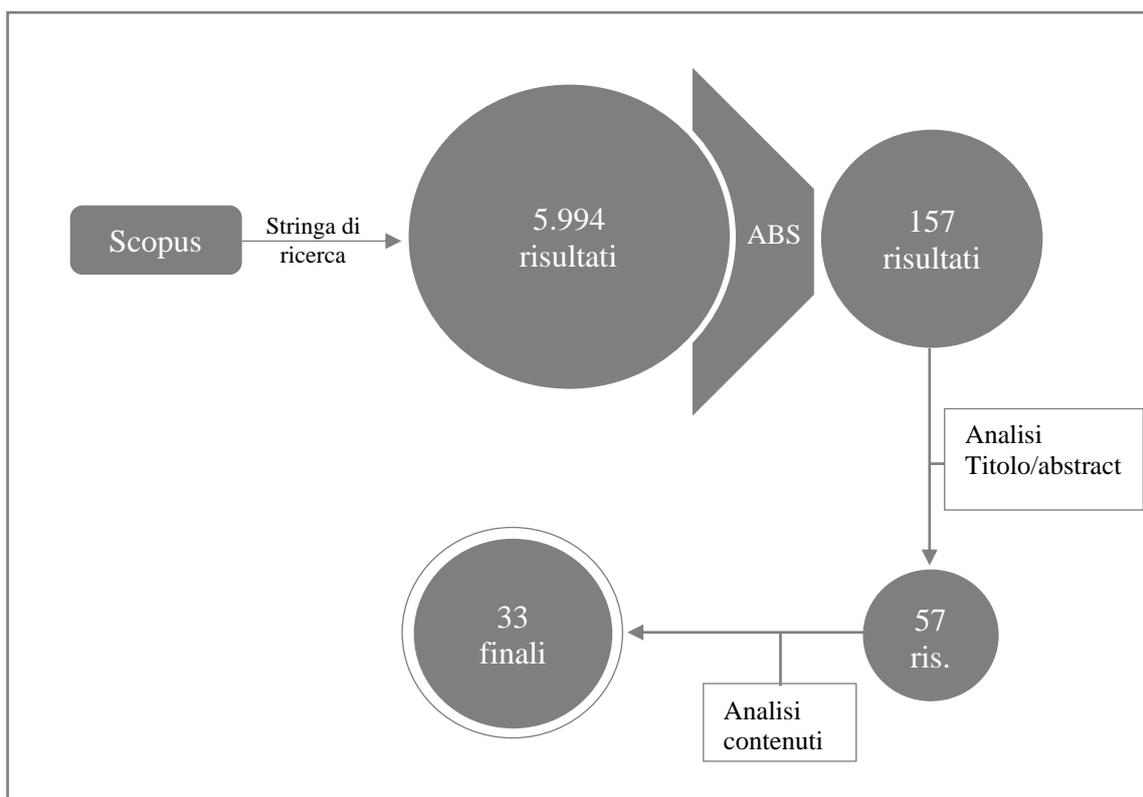


Fig. 4.1 – Processo di reperimento letteratura

L'obiettivo, rispetto all'insieme degli articoli, è quello di identificare alcuni punti chiave, quali: tipo di IA studiata, operatori maggiormente coinvolti, ambito di applicazione, possibili benefici e ostacoli attesi. Ciò è funzionale a comprendere quali sono le tendenze attuali principali che riguardano l'argomento, per poterle successivamente esporre tramite questionario agli operatori intervistati in modo da guidarli su temi specifici per ottenere risposte specifiche.

Determinati elementi appaiono evidenti dalla ricerca. In primo luogo, è da notare una struttura tipica dei casi di studio proposti dagli articoli. Ciò ha a che fare con il fatto che l'applicazione dell'intelligenza artificiale al settore portuale è un tema ancora in divenire, poiché i casi reali di porti nel mondo che si avvalgono di tale tecnologia non superano la decina. Il motivo di ciò, oltre a quelli che vengono chiariti nel capitolo dedicato agli ostacoli all'implementazione, è la ancora bassa maturità dell'innovazione. La letteratura, infatti, si concentra su discussioni di natura ipotetica, scenari what-if e simulazioni di implementazione di diverse IA. La menzionata struttura tipica della letteratura si compone di:

1. Identificazione di un problema gestionale in un determinato ambito marittimo (caso di studio)
2. Creazione e descrizione di un'IA creata ad hoc per la risoluzione del suddetto problema
3. Run di simulazione dell'utilizzo del sistema di supporto decisionale intelligente
4. Confronto tra soluzione ottenuta dalla simulazione e dati reali

Ciò dimostra come l'utilizzo di ausili intelligenti nell'industria portuale si collochi ancora in una fase preliminare del suo stadio evolutivo.

Ogni articolo presenta contenuti, dal grado di approfondimento alla complessità dell'IA studiata; tuttavia, si riconoscono alcuni elementi comuni che appaiono con una maggiore o minore frequenza nella letteratura. In primo luogo, le intelligenze artificiali sviluppate, nonostante siano concepite ad hoc, si basano su un set comune di algoritmi che verranno illustrati successivamente. Ogni caso di studio osservato coinvolge, inoltre, nel sistema portuale una serie di operatori (autorità portuali, armatori, magazzinieri, operatori intermodali, navi ecc.), ma poiché il fulcro dell'attività commerciale portuale è dato dall'attività di movimentazione dei terminalisti, l'attenzione si rivolge principalmente a questi ultimi. Un'ulteriore categorizzazione della letteratura è data dall'ambito di applicazione dei sistemi di supporto decisionale intelligenti. La versatilità dell'IA, infatti, permette un supporto ad ambiti di natura anche significativamente diversa, dalla gestione e schedulazione delle gru di piazzale, alla previsione delle rate di nolo sul mercato.

Ciò che interessa maggiormente questo studio però è la considerazione dei vantaggi e delle opportunità che questi sistemi intelligenti possono rappresentare per il settore, senza però escluderne i conseguenti svantaggi e ostacoli. Nella letteratura i vantaggi dei singoli casi vengono presentati approfonditamente, mentre gli aspetti di difficoltà dell'implementazione hanno tendenzialmente un ruolo in secondo piano. In ogni caso i diversi benefici ed ostacoli all'adozione dell'innovazione compaiono sotto diverse forme, ma possono essere generalmente raggruppati e categorizzati come indicato in *Tab.4.2*:

<u>Benefici</u>	<u>Ostacoli</u>
Economici	Resistenza al cambiamento
Sostenibilità ambientale	Investimenti elevati
Vantaggio competitivo	Cybersecurity
Pianificazione operativa	Scarsa normativa
Supporto decisionale	Complessità di implementazione
Efficienza energetica	Strutture inadeguate
Qualità del servizio	Incertezza
Sicurezza	

Tab. 4.2 – categorizzazione benefici/ostacoli nell'implementazione dell'IA in porto

Prima di analizzare nello specifico di cosa trattano precisamente i singoli benefici ed ostacoli e quanta attenzione essi ricevono in letteratura, è opportuno costruire un quadro di riferimento per comprendere il concetto di intelligenza artificiale ed i potenziali ambiti marittimo portuali di applicazione. I capitoli seguenti vanno quindi a studiare i tipi di IA di potenziale utilità esistenti ed i contesti operativi in cui possono svolgere una funzione di supporto significativa.

IV.2. L'IA nel settore marittimo portuale

Nel contesto marittimo operazioni complesse che richiedono alti livelli di pianificazione, programmazione, ottimizzazione e gestione di grosse mole di dati, sono distribuite su un vasto numero di ambiti. Per questo motivo l'intelligenza artificiale, essendo in grado di fornire supporto a ciascuna delle attività menzionate e presentando come descritto nel capitolo precedente caratteristiche di flessibilità ed adattabilità, ha la possibilità di essere implementata in ambiti molto differenti. La letteratura dà dimostrazione di ciò tramite l'eterogeneità dei contesti di applicazione studiati. Alcuni di questi non riguardano propriamente i sistemi portuali come focus centrale ma generano effetti indiretti (in senso di traffici, efficienza, sicurezza ecc.) che interessano l'insieme degli operatori portuali. Categorizzando gli articoli dell'insieme ottenuto in fase di ricerca della letteratura gli ambiti di maggiore interesse consistono in:

- Nave
- Gestione di immobilizzazioni
- Sicurezza
- Gestione operativa
- Mercato marittimo
- Assegnazione banchina
- Gestione piazzale
- Crane scheduling
- Movimentazione container
- Logistica generale
- Equipaggio

Nave – È un ambito interessato da tecniche di ottimizzazione intelligenti soprattutto per questioni di efficienza energetica e moderazione del consumo di carburante. I tipi di supporto decisionale aiutano il decisore - solitamente l'armatore - a scegliere la velocità di viaggio più appropriata in considerazione di una serie di fattori quali: range di rpm del

motore, tipo e condizioni dello scafo, nodi di vento, condizioni del mare e andamento del mercato³ con lo scopo di contenere quanto più possibile i costi relativi alla voce bunker (Besikçi et al. 2016). L'ottimizzazione di consumo energetico non si limita alla fase di viaggio della nave ma persiste anche nella sosta in porto, in cui i motori ausiliari continuano ad essere tenuti in operatività per fornire la nave di elettricità.

Gestione asset – Le attività svolte in porto, in particolare le attività terminaliste, sono notoriamente di natura capital intensive. Gli asset essenziali per fornire servizi portuali rappresentano ingenti investimenti, la cui entità, in fase di gara per ottenere la concessione del terminal, deve essere giustificata insieme alle relative fonti di finanziamento da un business plan pluriennale. Selezionare in quali asset investire, come ammortizzarli e quali cashflow aspettarsi comporta una serie di decisioni che andranno a determinare aspetti contingenti dell'attività portuale fornita, per cui è fondamentale che tali decisioni siano ponderate quanto più possibile. L'IA è in grado di fornire sostanziale supporto nelle decisioni di investimento prendendo in esame una varietà di fattori di natura diversa come, ad esempio, indicatori di produttività (tipicamente il ROI), il grado di consumo energetico, la capacità del terminal, il carico immesso dalle potenziali navi servite ecc. Poiché ogni elemento è solitamente caratterizzato da un peso sul decision making diverso, il sistema intelligente di supporto può, in uno scenario ipotetico, elaborare le decisioni creando contestualmente scale di priorità (Bulut et al. 2019).

Sicurezza – I sistemi portuali generalmente presentano un certo grado fisiologico di rischio nello svolgimento delle diverse attività, non a caso l'ambiente portuale è fortemente normato da convenzioni imposte dall'IMO, leggi nazionali e standard di sicurezza. Il rischio si manifesta in vari contesti, per cui l'IA, con le relative caratteristiche di adattabilità e flessibilità, può fornire supporto anche in ambito di sicurezza portuale tramite identificazione e prevenzione del rischio. Suddetti contesti possono spaziare, per esempio, da possibili collisioni “nave su nave” o “nave – infrastruttura” (Zaman et al. 2014) a standard di safety & security sottoposti a PSC (Chen C. et al. 2014) o ancora a protezione delle infrastrutture da disastri ambientali (Cremen et al. 2022).

³ Noli alti portano gli armatori a voler effettuare più viaggi possibili per sfruttare al meglio il mercato spot e ad aumentare conseguentemente la velocità di navigazione.

Gestione operativa – Riferita principalmente all'attività terminalista la gestione operativa, soprattutto nel trasporto di linea, beneficia particolarmente di decision support systems per la natura routinaria dell'attività e della necessità di ottimizzazione della stessa. L'orizzonte temporale considerato è tendenzialmente di breve periodo dato che il fulcro della gestione operativa, oltre alle regolari operazioni di carico/scarico, consiste nella pianificazione dello stoccaggio e nella fornitura dei servizi a valore aggiunto (VAS) a contenitori pieni e vuoti (*Bandiera et al. 2009*).

Mercato marittimo – Nonostante il mercato marittimo non riguardi in maniera diretta il porto, oscillazioni nell'andamento (dovuti a fluttuazioni di tariffe o eventi geopolitici) incidono sui traffici e sulla quantità di navi che intendono toccare un determinato porto. L'intelligenza artificiale in questo ambito può operare in connessione a indici di nolo, come ad esempio il BDI, in modo da combinare in tempo reale tutte le informazioni di rilevanza per l'andamento dello stesso per darne una probabile previsione di evoluzione (*Yang et al. 2019*). Il mercato marittimo, dipendendo dalla domanda della materie trasportate e dal rispettivo mercato, segue andamenti ciclici, dei quali gli armatori devono essere a conoscenza costantemente per conseguire utili o solo sopravvivere. Tale capacità dipende strettamente dalla flotta di cui sono dotate (navi con ampie stive permettono di usufruire di economie di scala, ma riuscire a saturare la stiva è più complesso), per cui gli armatori beneficerebbero di sistemi di supporto decisionale intelligenti nella scelta della nave in fase di investimento (*Wibowo et al. 2012*). Il tipo di nave operante sul mercato e quale capacità di stiva rappresenta ha impatto sulla quantità di carico immesso nelle strutture portuali. Infine, un ulteriore vantaggio dell'uso dell'IA sul mercato marittimo è dato dall'assistenza e/o intermediazione nei rapporti commerciali tra caricatori-noleggiatori, armatori e operatori portuali, i quali spesso, prevedendo controparti di nazionalità e contesti molto differenti, necessitano di conciliazione delle differenze culturali per uno svolgimento di operazioni commerciali più agevoli (*Rau et al. 2006*).

Assegnazione banchina – Nonostante l'assegnazione della banchina alle navi in arrivo consista in un'operazione complessa dal punto di vista tecnico, dal punto di vista decisionale i fattori da considerare sono numerosi. Si assegna una banchina in base a caratteristiche della nave (lunghezza, altezza, pescaggio, carico trasportato ecc.),

caratteristiche del terminal stesso (lunghezza della banchina, numero e tipo di gru disponibili), con lo scopo di raggiungere un determinato risultato di efficienza complessiva e di evitare la formazione di congestione (*De León et al. 2017*). Il livello di efficienza incide sull'attrattività del terminal e in generale del porto, per cui il rischio di generazione di circoli viziosi per scarse performance a fronte di bassa attrattività è alto (*Lokuge et al. 2007*). L'intelligenza artificiale potrebbe avere dunque un potenziale ruolo di supporto nelle decisioni di assegnazione, grazie nello specifico alla possibilità di prevedere l'ETA delle navi da servire (*El Mekkaoui et al. 2023*).

Gestione piazzale – L'ambito della gestione piazzale ha un ruolo centrale nell'attività terminalista. Generalmente si riconoscono alcune fasi tipiche in tal gestione: trasferimento da banchina a piazzale tramite mezzi/ralle, assegnazione del contenitore ad un posizione in piazzale in funzione di tipo, peso, dimensione e destinazione, eventuali scartaggi, inoltro del contenitore nel sistema di trasporto inland. Da considerare sono anche i possibili servizi a valore aggiunto offerti dal terminalista ai quali si sottopone il carico. Sistemi intelligenti di supporto decisionale possono trovare applicazione in ciascuna fase. Il riordino dei contenitori e gli scartaggi sono operazioni sintomi di inefficienze dovute ad un'organizzazione non ottimale, che si potrebbe definire fisiologica, poiché l'organizzazione della disposizione a piazzale dei contenitori, basandosi su criteri anche discordanti fra loro, difficilmente raggiunge livelli di massima efficienza (*Maldonado et al. 20219*). Oltre a migliorare tale condizioni l'intelligenza artificiale presenta un potenziale di agevolazione dell'incontro tra domanda e offerta all'interno del terminal (*Mar-Ortiz et al. 2020*) e di aumento della sinergia tra mezzi operanti sul piazzale come gru e AGV (*Castilla Rodriguez et al. 2022*).

Crane scheduling – Successiva all'assegnazione della banchina è la programmazione dell'attività delle gru. Le gru, limitate in numero, devono essere distribuite con criterio tra le navi servite a seconda della quantità di carico di ciascuna sezione per ciascuna nave, cercando allo stesso tempo di operare con massima efficienza evitando possibile congestione. La programmazione delle gru (CSP – crane scheduling problem), insieme alle attività preventive di allocazione delle banchine (BAP – berth assignment problem) e allocazione gru (CAP – crane assignment problem), incidono fortemente su tempi di attesa e tariffe dei servizi e costituiscono pertanto il fulcro delle

prestazioni del terminal. Si tratta quindi di un ambito che lascia ampio spazio di miglioramento tramite l'introduzione di sistemi intelligenti di supporto decisionale (*Ursavas et al. 2014*).

Movimentazione container – Oltre alla gestione a piazzale, i contenitori subiscono movimentazioni anche in operazioni circostanti, soprattutto nelle fasi pre- e post-yard (scarico dalla nave e inoltro su mezzi intermodali). Tipicamente nel trasporto di linea l'obiettivo è quello di usufruire di impianti tali da beneficiare di economie di scala e minimizzare di conseguenza quanto più possibile i costi. In tal senso, nel movimentare i carichi, sarebbe opportuno effettuare consolidamento per ridurre i costi medi unitari. Si tratta, tuttavia, di un'attività che richiede grandi capacità di elaborazione di dati e rappresenta quindi campo fertile per l'applicazione di intelligenze artificiali (*Fazi et al. 2015*). Un ulteriore aspetto in ambito di applicazione IA alla movimentazione container consiste nella possibilità di utilizzare reti di geolocalizzatori per tenere traccia in tempo reale dei contenitori all'interno del terminal (*Ngai et al. 2011*).

Logistica generale – Alterazioni del sistema porto sono effetti collaterali dell'evoluzione e introduzione di innovazioni nel quadro logistico generale strettamente connesso con il concetto di industria 4.0 (*Min H. et al. 2022*). Trasformare le tecniche di logistica utilizzate finora tramite l'introduzione di sistemi intelligenti, andrà a riflettersi a cascata sul framework portuale ed è dunque fondamentale tenere conto degli sviluppi innovativi a monte del porto per essere in grado di riadattare le attività a possibili cambiamenti esogeni del business (*Foster et al. 2020*). All'interno del tema della logistica generale può essere inclusa l'innovazione dell'IA in connessione alla robotica. Il tema della robotica abbinato ai sistemi portuali non è coperto in modo approfondito dalla letteratura, si concentra però sull'applicazione della robotica alle tecniche di magazzinaggio. Ciò può comunque giovare ai porti, nello specifico alle attività terminaliste che offrono VAS di magazzinaggio. I robot intelligenti utilizzabili nei magazzini fanno fronte alla sfida data dalla domanda il cui grado di dinamicità cresce costantemente nel tempo e che porta i magazzini ad assistere a movimentazione interna sempre più frequente fino se non continua (*Li Z. et al. 2020*). Esistono però attività portuali in cui la robotica trova effettiva applicazione come nel caso dei terminal rinfuse. Le stive delle rinfusiere, tipicamente fungibili fra diverse merceologie, necessitano di

essere lavate fra lo scarico e carico di carichi diversi. Solitamente, tuttavia, tale attività viene svolta da personale in tempi eccessivamente lunghi e con inefficienze non trascurabili, per cui robot intelligenti possono essere applicati in tale ambito come proposto da Le A. V. et al. (2021).

Equipaggio – Nonostante si ritenga che la rilevanza dell’equipaggio possa essere confinato all’ambito nave, nella realtà dei fatti un equipaggio selezionato propriamente si riflette anche nella permanenza in porto della nave, si pensi, per esempio, alle operazioni di ormeggio. Come la gestione dello yard, il crew management è un’attività sottoposta a numerosi vincoli operativi che portano la composizione dell’equipaggio a non essere selezionata in maniera ottimale. Oltre a ciò, trattandosi di un ambito labour-intensive, si è soggetti a inefficienze dovute al comportamento umano (Es. “no-show” in porto al momento dell’imbarco), motivo per cui l’intelligenza artificiale può assistere il crew manager in una più agevole gestione dei relativi pool di marittimi (Giachetti et al. 2013).

Ciascuno degli ambiti menzionati, appare in letteratura con maggiore o minore attenzione da parte degli studiosi, si osserva infatti una distribuzione di casi di studio come indicato in Fig. 4.3:

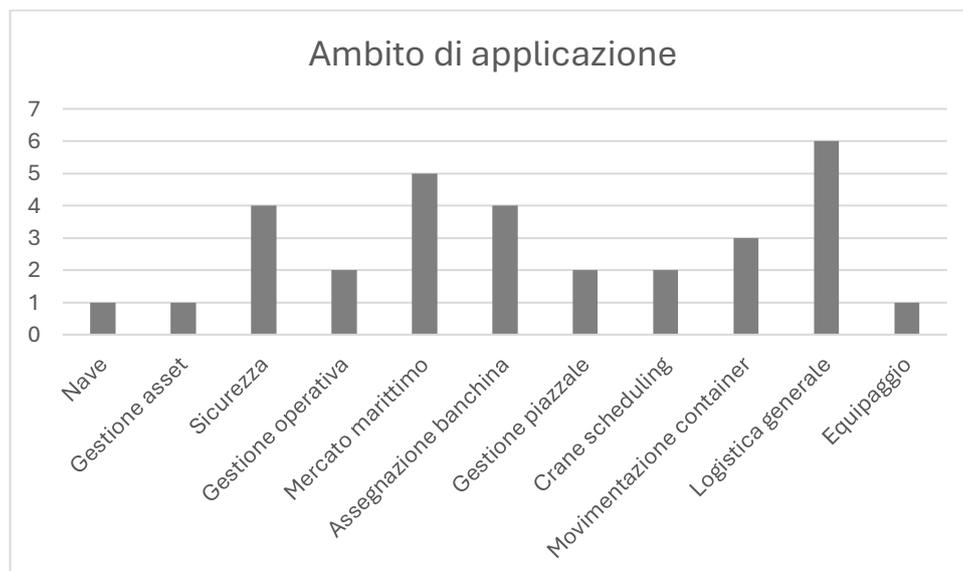


Fig. 4.3 – Ambiti portuali per la potenziale applicazione dell’IA

IV.3. Operatori coinvolti nell'introduzione di IA nel sistema porto

Un elemento che contraddistingue l'intelligenza artificiale da altre innovazioni è la sua universalità. L'applicabilità della stessa, infatti, è diffusa a tal punto da avere utilità in una serie di contesti diversi a beneficio di soggetti diversi. Ciò è osservabile anche in letteratura dal ventaglio di possibili operatori che potrebbero usufruire di IA nelle rispettive attività di natura anche significativamente diversa. Nonostante nel singolo porto operino numerosi soggetti ciascuno di fondamentale importanza per il funzionamento dell'insieme, nello studio della letteratura emergono alcune figure chiave:

- Terminalisti
- Armatori e caricatori
- Autorità
- Operatori logistici

IV.3.1. I terminalisti

Come nel caso di “Analytics meets port logistics: A decision support system for container stacking operations” di *Maldonado et al. (2019)*, in cui il tool di IA supporta le operazioni di stoccaggio dei container a piazzale, una soggetto coinvolto centralmente dalla diffusione dell'innovazione nel porto consiste nel terminalista, ovvero la figura che gestisce le operazioni di un terminal portuale utilizzando in concessione l'area demaniale comprensiva di banchina. Presso la struttura specializzata del terminal vengono svolte le operazioni di carico, scarico, stoccaggio e movimentazione delle merci e sono categorizzabili a seconda di diversi criteri (rinfuse o container, industriale o commerciale, specializzato o polivalente...). Compito del terminalista è quello di:

1. Gestire le operazioni ordinarie quali scarico/carico, movimentazione e stoccaggio
2. Allocare le navi in arrivo alle banchine
3. Garantire la conformità dell'attività rispetto alla normative internazionali in tema di sicurezza (umana ed ambientale)

4. Pianificare la gestione dei traffici con obiettivi di massima efficienza
5. Effettuare la manutenzione ordinaria e straordinaria delle infrastrutture ed attrezzature
6. Intrattenere rapporti commerciali con compagnie di navigazione, spedizionieri o altri operatori

Il terminalista è la figura centrale dell'attività portuale, funge da portale per il commercio internazionale collegando i traffici marittimi a quelli inland. Operare in ottica di efficienza è quindi di rilevanza non solo per il terminal stesso ma anche per il resto della catena logistica. Per questo motivo lo studio dell'implementazione dell'intelligenza artificiale nel porto si focalizza sul terminalista soprattutto nella gestione delle immobilizzazioni materiali ed infrastrutture con monitoraggio dei relativi indici di prestazione, movimentazione dei contenitori e programmazione dell'allocazione della nave alla banchina. Il ruolo rilevante del terminalista si riflette sull'attenzione ottenuta in letteratura; il 53% ca. degli articoli trattano infatti questa figura.

IV.3.2. Armatori e caricatori

L'armatore è la persona fisica o giuridica che ha la proprietà della nave e si occupa della gestione della stessa. Può essere il soggetto che ha acquistato effettivamente la nave, da cantiere o sul mercato second hand, oppure può avere la nave sotto il completo controllo ma data in disponibilità dall'effettivo proprietario tramite un contratto di locazione a scafo nudo. All'interno del porto l'IA può svolgere ruoli di diretto interesse per gli armatori, ad esempio, operazioni di manutenzione come proposto da *Le A. V. et al. (2021)* in *“Towards optimal hydro-blasting in reconfigurable climbing system for corroded ship hull cleaning and maintenance”*. Le responsabilità dell'armatore si articolano in una serie di ambiti (*Fig. 4.4*).



Fig. 4.4. Responsabilità dell'armatore

È responsabilità dell'armatore iscrivere la nave nel registro competente presso la rispettiva autorità di bandiera e così come la conseguente gestione operativa. Il mezzo nave deve poi essere messo in condizione di navigabilità tecnica ed umana, per cui l'armatore si occupa della manutenzione ordinaria e straordinaria nel rispetto delle normative internazionali a cui è sottoposta (*SOLAS*, *STCW*, *INMARSAT* ecc.), in modo che la nave e l'equipaggio siano in grado di rispondere a situazioni straordinarie ed emergenze. È competenza dell'armatore

fornire la nave di un equipaggio qualificato in conformità con quanto imposto dal registro; deve inoltre garantire condizioni di lavoro adeguate. In senso commerciale l'armatore pianifica la configurazione delle rotte in funzione dei carichi da trasportare espresse nei contratti di impiego. Questi devono essere gestiti in base all'andamento del mercato, rispetto al quale l'armatore sceglie se contrarre rapporti commerciali spot o di lungo periodo. La nave è soggetta a ispezioni periodiche da parte della società di classificazione competente a fronte delle quali vengono rilasciate certificazioni da iscrivere nel registro per dimostrarne la conformità alla legge. Infine, l'armatore è obbligato ad assoggettare il mezzo nave a copertura assicurativa, la quale non riguarda esclusivamente copri e macchinari (*hull & machinery*), ma anche responsabilità e indennizzi (offerta dai *P&I Club*).

Anch'esso è di fondamentale importanza per il commercio internazionale per ovvie ragioni, in assenza dell'armatore non si disporrebbe dei mezzi che collegano i paesi via mare troncando quindi gli scambi globali.

In tema di intelligenza artificiale all'armatore interessa ciò che riguarda la gestione nave. Il guadagno infatti deriva nell'operating dalla massimizzazione del ritorno giornaliero, ottenibile fra le alternative tramite minimizzazione dei costi e stipulazione di contratti in maniera strategica, e nell'asset play dall'acquisto della nave in fase di mercato basso e

dalla successiva vendita ad un prezzo gonfiato da noli maggiori. L'IA potrebbe quindi assistere nel risparmio di costi come, per esempio, nell'ottimizzazione della velocità di viaggio e nel conseguente risparmio di carburante. Sul livello commerciale invece, gli armatori potrebbero beneficiare della previsione dello sviluppo del mercato dei noli e nella mediazione dei rapporti commerciali con altri soggetti.

I caricatori (e noleggiatori) sono considerati congiuntamente agli armatori nello studio della letteratura, poiché il possibile ausilio dell'intelligenza artificiale impatta le stesse aree di interesse dei primi. L'efficienza e la riduzione dei costi della nave si riflettono con probabilità su strategie di costo dell'armatore e sulle tariffe offerte ai caricatori. La capacità di previsione dell'IA applicata all'andamento dei noli permette ai caricatori di capire quando e dove è conveniente spedire le proprie merci ed infine beneficerebbero anche loro della mediazione nei rapporti commerciali in quanto controparte degli armatori.

IV.3.3. Autorità portuali

In ogni porto la presenza dell'autorità portuale, minore o maggiore a seconda del paese di appartenenza, è fondamentale per la gestione, regolamentazione, sviluppo e sicurezza dello stesso. L'autorità portuale ha il compito di:

- coordinare le operazioni portuali
- garantire l'efficienza della catena logistica
- promuovere il commercio
- assicurare il rispetto delle normative ambientali e di sicurezza

L'evoluzione del porto dipende strettamente dalle strategie messe in atto dalle autorità portuali; nella funzione di promozione dello sviluppo, infatti, è incluso l'impegno all'implementazione tecnologica per migliorare l'efficienza operativa e alla digitalizzazione. Altrettanto rilevante è la funzione di regolamentazione e controllo delle attività svolte all'interno dei confini del porto. L'obiettivo per l'autorità portuale è quello di assicurare il rispetto da parte dei soggetti operanti in porto delle normative internazionali, nazionali e interne al porto e di incentivare e monitorare l'implementazione di misure di protezione ambientale e di riduzione dell'inquinamento

in conformità con le convenzioni internazionali competenti (principalmente MARPOL). Anche le autorità portuali sono delle figure essenziali per il funzionamento del sistema porto, soprattutto grazie al compito di agevolazione del commercio internazionale e dello sviluppo economico della regione di appartenenza. Un'efficiente gestione delle operazioni portuali, riflessa sulla qualità dei servizi e sulle tariffe applicate a clienti e terminalisti, beneficia l'attrattività del porto e la relativa competitività così come il benessere economico delle aree circostanti. In base a questo framework gli ambiti di applicazione di intelligenze artificiali di interesse per le autorità portuali consistono nella prevenzione di inquinamento e nella gestione della sicurezza. È di fatti dimostrato in letteratura, che nei casi in cui il soggetto studiato è rappresentato dall'autorità portuale, la conseguente implementazione dell'IA riguarda solitamente la sicurezza del porto in senso di safety così come di security. Ne è un esempio lo strumento proposto in *"Fuzzy FMEA model for risk evaluation of ship collisions in the Malacca Strait: Based on AIS data"* da Zaman et al. (2014) volto alla prevenzione di collisioni tra navi nello stretto di Malacca.

IV.3.4. Gli operatori logistici

Ad operare nel contesto portuale vi sono, oltre alle figure essenziali appena menzionate, anche altri attori di grande rilevanza che offrono c.d. servizi a valore aggiunto (VAS), come, per esempio, i magazzinieri portuali. A seconda delle caratteristiche delle caratteristiche della merce stessa e della relativa catena logistica può crearsi la necessità di doverla stoccare temporaneamente presso le strutture portuali. L'attività del magazzinieri si compone dunque di diverse fasi tipiche. In primo luogo, il magazziniere riceve le merci ispezionandole contestualmente le condizioni e la conformità rispetto ai documenti consegnati. In base alla configurazione del magazzino queste vengono stoccate negli appositi sistemi di stoccaggio con l'obiettivo di ottimizzazione dello spazio utilizzato. Una volta stoccate le merci sono inserite in inventario e sottoposte ad un periodico controllo per verificare l'aggiornamento dei dati e delle scorte. Giunto il momento di spedizione il magazziniere seleziona le merci richieste, le imballa, appone l'etichettatura adeguata per poi inoltrarle sui mezzi di trasporto. Anche nell'attività del magazziniere il rispetto delle normative di sicurezza tecnica e umana e la manutenzione

delle attrezzature sono alla base del buon svolgimento dell'attività. Rispetto alla catena logistica il magazziniere assume la funzione di volano tra i diversi ritmi di fornitura rappresentati dai diversi modi di trasporto, minimizzando così i tempi di attesa delle navi. Sono gli attori che in tema di IA ottengono attenzione per una sotto branca specifica della stessa, ossia la robotica. La configurazione dell'attività ed il tipo di strutture utilizzate sono particolarmente adatte all'utilizzo di sistemi robotici autonomi intelligenti in grado di ottimizzare l'utilizzo dello spazio ed effettuare più movimentazioni in contemporanea, come proposto da Li Z. et al. (2020) in "A mechanism for scheduling multi robot intelligent warehouse system face with dynamic demand".

Ciascuno degli operatori riportati ha un potenziale ruolo nell'introduzione di sistemi intelligenti nel porto, in letteratura, tuttavia, non sono considerati con uguale rilevanza. L'attenzione degli autori rispetto a suddetti operatori si distribuisce come riportato in Fig. 4.5:

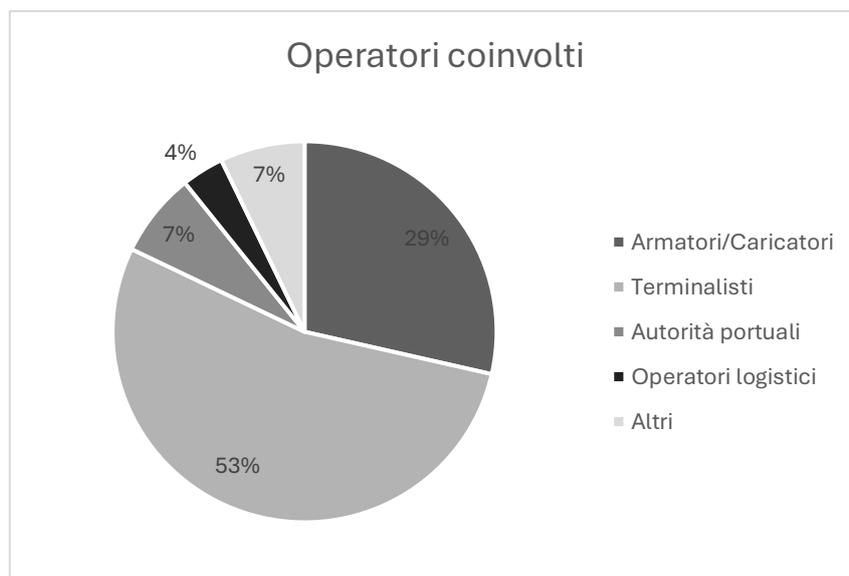


Fig. 4.5 – Percentuale di studi sull'IA in riferimento agli operatori portuali

IV.4. Benefici derivanti dall'implementazione di IA nel sistema portuale

Rispetto al tema dell'applicazione di intelligenze artificiali nel porto la letteratura propone tipicamente un modello concepito per la risoluzione di un problema, ne esplica gli effetti da applicazione ad un eventuale caso di studio e ne elenca i relativi vantaggi e possibili punti di debolezza. Viene sottolineato più volte come una delle caratteristiche principali dell'IA consista nell'adattabilità della stessa, i campi di interesse variano in natura, ma si riconoscono alcuni benefici dell'uso di IA nel porto comuni ai diversi ambiti. Suddetti benefici comuni non sono condivisi ugualmente dai diversi casi, bensì compaiono nel campione di letteratura con una maggiore o minore frequenza (*Fig. 4.6*):

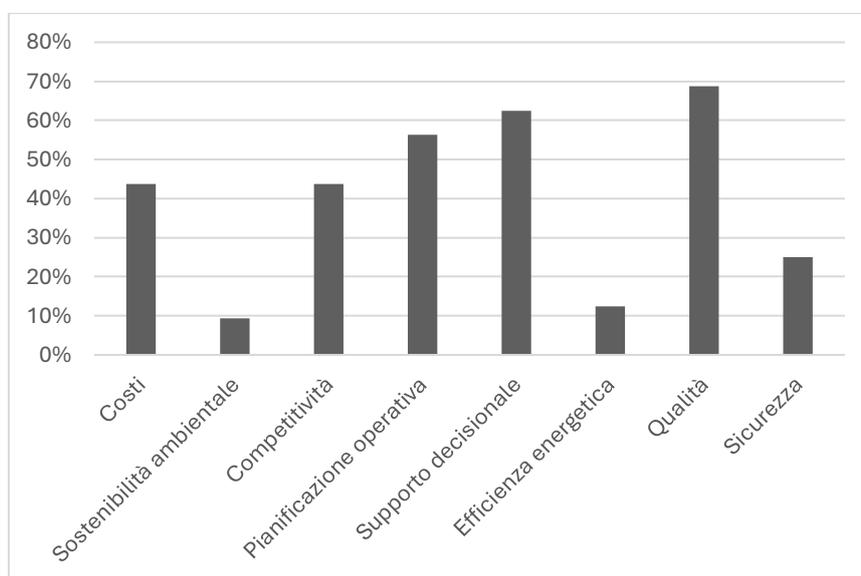


Fig. 4.6 - Frequenza nella letteratura dei vantaggi offerti dall'IA in ambito portuale

IV.4.1. La riduzione di costi

La possibilità di riduzioni di costi per la singola attività portuale rappresenta un vantaggio, e in taluni casi un vero e proprio obiettivo, in molti dei casi studiati. Trattandosi di un concetto piuttosto generale è opportuno analizzare le modalità proposte dalla letteratura, secondo cui l'applicazione di tool intelligenti in porto possa abbassare i costi sostenuti nella gestione dell'attività.

Cominciando da ciò che può essere interesse degli armatori: sono stati sviluppati alcuni modelli di intelligenza artificiale, il cui supporto permette di aumentare l'efficienza energetica dell'asset nave, riferendosi quindi ai consumi di carburante della stessa. *Besikçi et al. 2016* creano un'intelligenza nota come “rete ANN” basata su reti neurali con lo scopo, oltre di ottimizzare l'uso di bunker nel corso della navigazione anche di prevedere i consumi prossimi in funzione delle condizioni operative. Lo studio introduce un sistema di supporto alle decisioni (DSS) che utilizza il modello ANN per fornire un supporto agli armatori nelle decisioni operative considerando aspetti economici ed ambientali. Il DSS consente agli operatori di simulare diversi scenari operativi, valutare l'impatto sul consumo di carburante, i costi e le emissioni di CO₂ per conseguentemente prendere decisioni ben calibrate per migliorare l'efficienza energetica nelle operazioni della nave. Il caso di studio analizzato prende in esame 233 rapporti di mezzogiorno di una petroliera, che nel corso del periodo di esame ha passato il 51% del tempo in navigazione, il 25% in rada, l'11% in porto ed il restante 4% alla deriva. La rete ANN, considerando elementi quali l'RPM⁴, le condizioni dello scafo, il trim⁵, il carico ed il meteo ha previsto il consumo di carburante con accuratezza ben maggiore rispetto al modello statistico tradizionale di regressione multipla basato sull'analisi di dati storici come illustrato in *Fig. 4.7*.

⁴ RPM: Revolutions Per Minute (rotazioni al minute)

⁵ Trim: pistone idraulico regolatore della posizione del motore; modifica l'angolo tra lo specchio di poppa e il gambo del fuoribordo

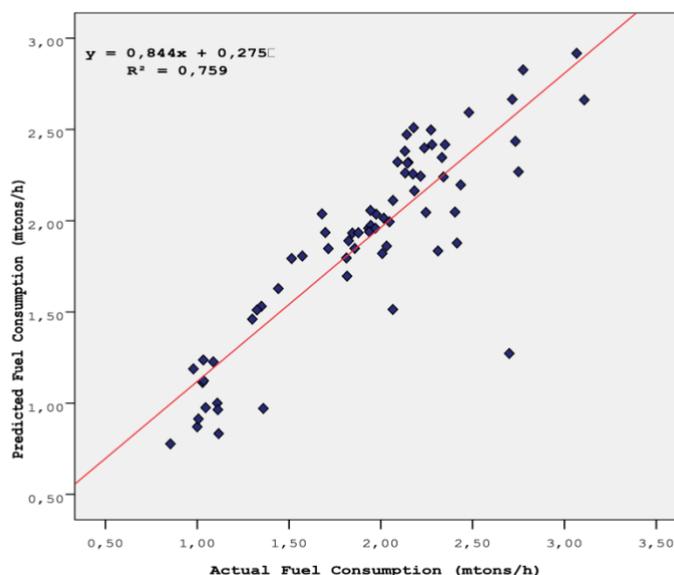


Fig. 4.7 – Relazione tra consumo di carburante effettivo e previsto utilizzando il modello ANN

“An artificial neural network based decision support system for energy efficient ship operations” – Besikçi et al. 2016

Continuando con aspetti rilevanti per gli armatori, una seconda voce di costi di esercizio particolarmente ingente nella gestione nave è rappresentata dall’equipaggio. Il crew management presenta la sua difficoltà maggiore nella schedulazione dei turni dei singoli membri di equipaggio, poiché, secondo la tabella minima di armamento, la nave non è considerata in condizioni di navigabilità umana se anche un solo ruolo a bordo non è coperto dalla rispettiva figura abilitata al determinato grado imposto, per cui nel momento in cui un membro di equipaggio non imbarca per errori nella schedulazione la nave è costretta al fermo in porto. *Giacchetti et al. 2013* propongono in ambito di equipaggio il sistema intelligente “LAPS” per la schedulazione dello stesso. Tale sistema è in grado di tenere conto dell’incertezza nell’organizzazione dei turni dovuta a mancate presentazioni (“no-show”) o terminazioni anticipate dei contratti. LAPS (Local Area Planning System), implementa un processo di pianificazione composto da due fasi: nella prima fase si determinano i livelli di overbooking per il numero di contratti da offrire al personale; nella seconda fase, si utilizza una formulazione di programmazione lineare intera (PLI)⁶ con l’obiettivo di minimizzare i costi di movimento del personale,

⁶ Programmazione Lineare Intera: Problema della ricerca operativa volta all’elaborazione di una soluzione ottimale in un contesto in cui le variabili possono assumere esclusivamente valori interi

mantenendo i livelli di personale adeguati e la composizione regionale desiderata. Nel caso di studio osservato il sistema LAPS ha dimostrato di poter ridurre i costi di movimento del personale fino al 23%, cifra che specialmente nei casi di navi di grandi dimensioni ha un importante riflesso a bilancio.

Passando al lato terra la riduzione dei costi si manifesta in una serie di ambiti diversi. Nella gestione contenitori una fonte è data sicuramente dai costi di trasporto, di gestione e di stoccaggio dei contenitori. I DSS proposti in letteratura per la gestione di suddette attività sono numerosi, poiché le operazioni che compongono la gestione contenitori si prestano facilmente alla misurazione e simulazione, tenendo pur sempre in considerazione un certo livello di incertezza da tradurre in stocastica nei modelli matematici sottostanti a tali DSS. Ridurre i costi, in questo caso, significa ridurre la permanenza dei contenitori a piazzale e minimizzarne i riordini. Quest'ultimo infatti rappresenta il maggiore indicatore di efficienza dello yard management; la disposizione dei contenitori a piazzale deve essere pensata in maniera tale da dover impiegare la minore quantità possibile di risorse (macchinari, energia, forza lavoro) per la loro movimentazione, per cui i contenitori prossimi alla dipartita sono idealmente posizionati nei tiri più alti per evitare scartaggi. L'elemento di difficoltà in ciò è dato dai vincoli a cui il decision maker è sottoposto, poiché in realtà la posizione a piazzale del contenitore dipende da: tipo, dimensione, peso, destinazione ed eventuale presenza di merci pericolose. La compresenza di questi vincoli rende il processo decisionale piuttosto complesso per l'umano, ma facilmente computabile per modelli di IA in grado di analizzare più criteri contemporaneamente in brevissimo tempo. *Maldonado et al. 2019* affermano che la ricerca della disposizione ottima dei container a piazzale è il presupposto per il miglior utilizzo dello spazio e per la conseguente riduzione dei tempi di turnover, ulteriore indicatore di efficienza nel terminal. Gli autori prendono in esame il porto di Arica in Cile, il quale svolge una funzione di portale per il 70% dei traffici da e per la Bolivia. La particolarità del porto osservato consiste nella mancanza di tasse di stoccaggio dovuta ad un accordo di pace risalente al 1904 tra Cile e Bolivia, per cui i tempi di permanenza delle merci sono estremamente lunghi. Per questo caso viene proposto un DSS intelligente in grado di prevedere i tempi di permanenza dei container utilizzando tecniche statistiche ed un modello di programmazione lineare matematica pensato per minimizzare il numero di riordini dei container nel rispetto dei vincoli menzionati. Il

sistema è stato quindi testato con dati dal porto di Arica, rivelando un'efficacia nel supporto alle decisioni e un miglioramento delle operazioni rispetto alle pratiche attuali.

Alla luce di ciò non è da pensare che ciascun terminal movimenti i propri contenitori a piazzale senza criteri, la realtà dei fatti è che con l'avanzamento tecnologico quasi ogni terminal operativo attualmente può fare affidamento ad un proprio TOS (terminal operating system), che applica algoritmi e modelli matematici sufficientemente evoluti da alleggerire il compito del decision maker responsabile. È tuttavia fisiologico nel corso della vita di una tecnologia, che dopo un certo grado di evoluzione della stessa, subentri un'ulteriore tecnologia sorpassando i limiti della esistente. Questo processo rappresenta la base di quanto proposto da *Lokuge et al. 2007*: a livello di sistema di supporto decisionale per la riduzione dei riordini e massimizzazione della produttività si usava tradizionalmente in molti casi, come il Jaya Container Terminal ed i Patrick Terminals⁷, un sistema BDI⁸ (Belief Desire Intention), modello antenato dei principali agenti intelligenti moderni. Si tratta di un modello valido utilizzato tutt'ora in diversi ambiti, ma non del tutto appropriato per l'applicazione alla realtà portuale a causa di un difetto fondamentale: non ha la possibilità di considerare l'incertezza. Quest'ultima rappresenta un elemento distintivo delle attività connesse al mondo marittimo ed al commercio internazionale visto il numero di variabili esogene a cui è sottoposto il trasporto via mare e verrà ripresa infatti più volte. Gli autori sviluppano un secondo modello intelligente basato su un sistema di inferenza neuro-fuzzy adattivo noto come ANFIS in grado di gestire al meglio incertezza ed ambiguità, il cui scopo non è tuttavia quello di sostituire il modello precedente, bensì di integrarlo creando un ibrido per combinare idealmente i punti di forza di entrambi.

Una seconda attività fulcro nel lavoro del terminalisti è data dal cosiddetto BAP (berth allocation problem o problema dell'allocazione della banchina). La nave giunta nelle acque del porto deve essere accolta dal terminal da una banchina libera, le cui

⁷ Jaya Container Terminal - Porto di Colombo in Sri Lanka

Patrick Terminals - Porto di Melbourne

⁸ Sistema Belief Desire Intention: "Modello software sviluppato per programmare agenti intelligenti, progettato per simulare processi decisionali e di ragionamento simili a quelli umani. Il modello si basa sulla teoria del ragionamento pratico, che si occupa di come gli agenti possono deliberare su cosa fare in una determinata situazione. Il modello software Belief-Desire-Intention (BDI) è stato sviluppato sulla base della teoria del ragionamento pratico umano proposta dal filosofo Michael Bratman. Successivamente, il modello è stato adottato per agenti software dai ricercatori Anand Rao e Michael Georgeff tra la metà degli anni '80 e l'inizio degli anni '90" - Stephen M. Walker II su klu.ai

caratteristiche devono essere tali da mantenerla in sosta in porto il meno possibile. L'allocazione dipende dunque dalla lunghezza della nave, dalla larghezza, dal pescaggio, dalla quantità e tipo di carico, dalle gru disponibili. Per il terminalista assegnare in maniera ottimale la banchina alla nave è essenziale perché il tempo di permanenza della nave rappresenta oltre che un indicatore di efficienza anche un costo. Un'assegnazione impropria comporta inefficienze, tempi dilatati, costi per maggiore occupazione delle attrezzature che si vanno a riflettere conseguentemente sulle tariffe offerte e sulla competitività del terminal. Il BAP è un tema affrontato frequentemente in letteratura ed i modelli IA proposti per il supporto in tale attività sono diversi. Ciò che la maggior parte dei modelli hanno in comune è il fatto che gli algoritmi sottostanti lavorano per istanze e scenari come sottolineato da *De León et al. 2017*, poiché la ricerca della soluzione ottimale avviene per confronto di combinazioni possibili di assegnazione delle banchine alle navi in arrivo in un determinato orizzonte temporale. A fronte di ciò, *Pratap et al. 2017* presentano un modello ibrido tra algoritmo genetico ed algoritmo di "ottimizzazione della reazione chimica", il cui scopo consiste nella riduzione dei tempi di sosta delle navi in porto rispetto a scale di priorità assegnate alle navi. Gli autori sottolineano che la riduzione della sosta comporta la riduzione di costi grazie all'ottimizzazione dell'uso delle risorse e migliora conseguentemente la qualità del servizio percepita da parte del cliente e quindi la reputazione del terminal stesso.

Nel caso dei magazzini portuali presenti in diversi terminal, i modelli di intelligenza artificiale si manifestano sotto forma di robotica. Lo scopo finale è quello dell'aumento dell'efficienza, per cui si ricercano metodi in grado di gestire numerosi ordini in contemporanea cercando di ridurre al contempo i tempi di preparazione. A proporre un modello intelligente integrato con sistemi robotici all'interno dei magazzini sono *Li Z. et al. 2020*, che individuano l'algoritmo del Particle Swarm Optimization (PSO), poiché particolarmente adatto per l'ottimizzazione dei tempi di completamento e per la conseguente riduzione dei tempi di attesa, il vantaggio di questo algoritmo consiste infatti nell'aggregazione e minimizzazione dei tempi complessivi. Il motivo per cui l'algoritmo è accostato all'utilizzo di robot ha a che fare con due aspetti: in primo luogo gli spazi dei magazzini sono solitamente piuttosto confinati, per cui sono necessari agenti in grado di spostarsi contemporaneamente in spazi ristretti ed in sincronia, secondariamente è

richiesto che gli agenti riescano a seguire la rapida e continua emissione di ordini dell'algoritmo.

L'intelligenza artificiale può avere un ruolo anche nei rapporti commerciali di negoziazione tra terminal e clienti. *Rau et al. 2006* sostengono infatti che delegare alcuni compiti nella fase di negoziazione contrattuale tra il terminalista e l'armatore interessato possa ridurre non solo i tempi per il raggiungimento di un accordo, ma anche la necessità di risorse umane impiegate. Queste, infatti, presentano intrinseche inadeguatezze nella negoziazione su scala internazionale dovute a inefficienze per differenze intellettuali e culturali. Gli autori presentano quindi un sistema di negoziazione automatizzata, basato sulle Funzioni di Decisione di Negoziazione (NDF) e su un meccanismo di automated learning, tramite i quali diventa possibile apprendere le preferenze dell'avversario, le tattiche di negoziazione ed il peso che ciascun potenziale contratto può avere sull'attività commerciale del terminal. Dopo aver appreso queste informazioni, il sistema applica un meccanismo di compromesso tale da raggiungere un risultato di negoziazione il più vicino alla soluzione ottimale di Pareto possibile.

Min H. 2022 offre infine un quadro generale in senso di logistica 4.0. vedendo la diffusione di DSS intelligenti su tutti (o quasi) i livelli della catena di approvvigionamento come un'opportunità di drastiche riduzione dei tempi di percorrenza della catena per le merci, di eliminazione dei costi derivanti da errori umani e dalla manodopera, di potenziale sfruttamento di economie nascoste e di nuove opportunità di business.

IV.4.2. La sostenibilità ambientale

Il tema della sostenibilità ambientale è ormai presente in pressoché ogni ambito del mondo commerciale moderno e la sua rilevanza segue un trend di costante crescita. Il trasporto marittimo non è certamente un'eccezione visto l'impatto che esso ha sull'ambiente. I sistemi di propulsione delle navi, infatti, si basano tutt'ora sulla combustione di olio poco raffinato e pesante, la forma più inquinante di combustibile utilizzata. Si pensi che 100.000 navi in circolazione generano fino al 3% delle emissioni di gas a effetto serra. L'anidride solforosa (SO₂) emessa da una singola nave può essere in alcuni casi pari all'emissione equivalente di 50 automobili. Proprio per questo motivo la costruzione di un sistema logistico fondato su modalità di trasporto sostenibile è

considerata come una delle sfide più rilevanti dei tempi moderni. Oltre al trasporto e quindi alla fase di navigazione, l'inquinamento ambientale trova origine anche nel porto stesso, in cui i mezzi inquinanti quali mezzi di mare e di terra si concentrano in un contesto spaziale limitato e formano un vero e proprio hub di emissioni. Ciascun porto avrà un peso diverso a seconda dei casi e della conformazione, per cui l'entità delle emissioni varia come riportato in *Fig. 4.8*:

Diossido di zolfo	2000	2005	2010	2015	2019
Napoli	9.914	4.033	544	577	739
Genova	2.921	976	317	211	237
Livorno	2.043	504	166	168	221
Venezia	1.482	442	234	171	173
Civitavecchia	800	235	199	104	167
Taranto	2.167	512	180	105	127
Trieste	1.147	320	161	129	115
la Spezia	916	315	153	121	109
Sarroch	1.011	200	76	50	88
Ravenna	815	247	96	68	79
Olbia	672	199	110	53	76
Palermo	357	135	71	53	73
Savona	764	157	70	64	71
Porto Torres	757	177	67	37	50
Catania	250	73	18	29	48
Milazzo	312	122	39	35	45
Priolo Gargallo	751	280	64	22	44
Capri	36	9	42	92	39
Gioia Tauro	640	186	53	32	34
Bari	266	103	32	22	34
Chioggia	342	62	80	27	33
Fiumicino	435	155	37	19	32
Ancona	586	174	33	33	31
Augusta	435	139	29	23	28
Reggio Calabria	34	38	55	18	28
Piombino	445	108	35	27	26
Trapani	73	19	13	18	26

Fig. 4.8 - Emissioni annuali di ossidi di zolfo (SO₂+SO₃) in tonnellate nei principali porti italiani (ambietenonsolo.com)

Sono evidenti i risultati migliorativi conseguiti nel corso degli anni, non significa tuttavia che il tema della sostenibilità sia quindi accantonabile, l'obiettivo diffuso a livello internazionale attualmente è di fatti quello di riuscire ad operare in quanto porto "net emission free".

Alla luce di ciò i progetti di introduzione di strumenti di intelligenza artificiale proposti in letteratura includono, idealmente, il sotto-obiettivo della sostenibilità ambientale. La realtà dei fatti dimostra però che solo il 9% degli articoli studiati affronta l'intelligenza artificiale in ottica green, nonostante la forte e crescente rilevanza dell'argomento.

Il sistema di supporto decisionale intelligente proposto da *Besikçi et al. 2016*, menzionato precedentemente nel capitolo "La riduzione dei costi", tratta appunto un modello di IA in grado di prevedere ed ottimizzare i consumi della nave basando il supporto su una serie di criteri (RPM, condizioni dello scafo, trim, carico e meteo). Nonostante l'obiettivo principale riguardi il contenimento dei costi di esercizio emerge ulteriormente il beneficio collaterale della riduzione delle emissioni.

In considerazione del piano europeo del "Fit For 55"⁹ il DSS proposto presenta particolare utilità per gli armatori nella rendicontazione delle emissioni, poiché dimostra di essere in grado di misurare efficacemente le emissioni in modo da facilitarne il relativo report, quando in un futuro prossimo suddette emissioni saranno soggette a tassazione. Per l'armatore avere un'idea chiara delle effettive emissioni generate dai propri asset permette inoltre di uniformarsi più facilmente e velocemente a norme imposte da organi internazionali come l'IMO, quali possibili nuove convenzioni internazionali.

Spostando l'attenzione all'ambito del terminal e nello specifico del piazzale le questioni di sostenibilità ambientale che si manifestano coinvolgono principalmente i mezzi utilizzati:

- Quay crane
- Straddle carrier
- Reach stacker
- RMG

⁹ La proposta FuelEU Maritime, in ottica del raggiungimento del piano Fit For 55, riguarda l'uso di combustibili rinnovabili e a basse emissioni di carbonio nel trasporto marittimo con l'obiettivo di ridurre l'intensità dei gas serra dell'energia usata a bordo delle navi sino al 75% entro il 2050

- RTG
- Camion

Allo stato attuale della tecnologia, nel terminal è possibile includere l'utilizzo di AGV (automated guided vehicles) integrabili con i sistemi IA ritenuti più opportuni. Si tratta infatti di mezzi senza conduttore progettati per lo spostamento a piazzale di merci e contenitori, il cui punto di forza consta nella reattività e ottimizzazione degli spostamenti nonché nella possibilità di essere alimentati da energia elettrica. Nonostante le potenzialità di questa tecnologia, solo il 3% dei terminal globali hanno adottato gli AGV; la poca diffusione si riconduce nella maggior parte dei casi all'entità dell'investimento da effettuare e alla resistenza esercitata dai sindacati a fronte della de-umanizzazione del terminal che rappresenta l'utilizzo di mezzi intelligenti. Tsolakis et al. 2022, oltre a riportare quanto menzionato, dimostrano ulteriori vantaggi dell'implementazione di AGV, tra cui la minimizzazione del routing. Utilizzando infatti algoritmi di programmazione lineare basati sul TSP¹⁰, i mezzi automatici sono in grado di effettuare il 10% dei viaggi in meno rispetto ai mezzi condotti da umani, come dimostrato nel caso di studio affrontato dagli autori nel porto del Pireo.

Nonostante l'intelligenza artificiale abbinata alla sostenibilità ambientale sia quindi un argomento caratterizzato da copertura scientifica ancora in fase embrionale, secondo alcuni autori come *Min H. 2022* si tratta del criterio motore che renderà i porti e generalmente la logistica propriamente 4.0.

IV.4.3. Aumento di competitività

La competitività di un terminal è di fondamentale importanza non solo per il porto che accoglie il terminalista, bensì è determinante per la configurazione dei traffici mondiali. Essendo il trasporto marittimo un business caratterizzato da bassa marginalità, la ricerca delle tariffe più convenienti influisce sui porti che gli armatori ed i noleggiatori intendono toccare nelle loro rotte. Le tariffe applicate dai terminal non rappresentano però l'unico

¹⁰ Il Travelling Salesman Problem (TSP) o “problema del commesso viaggiatore” è un tipico problema affrontato nella programmazione lineare, che prevede la ricerca dell'itinerario più breve (in termini di tempo, di distanza o di costo a seconda dei casi) tale da toccare una serie di nodi nel rispetto di determinati vincoli per poi ritornare al punto di partenza

fattore che guida il cliente a rivolgersi ad un porto piuttosto che un altro, poiché anche la qualità del servizio gioca un ruolo determinante. Il contesto marittimo, infatti, è soggetto a forte volatilità in cui la sicurezza e la certezza della spedizione sono essenziali anche per tutti i restanti nodi della catena di fornitura. Non tutti gli armatori scelgono, nell'operare la nave, terminal con buoni livelli di performance, ma ciò riguarda i casi in cui la mancanza di liquidità sufficiente porta l'operatore a ricercare tariffe basse a scapito della qualità del servizio ricevuto, risultando in probabile impropria movimentazione delle merci e ritardi nell'erogazione del servizio stesso. Nello studio della letteratura sull'intelligenza artificiale in ambito marittimo portuale, il 44% degli articoli presi in esame menziona l'aumento di competitività come uno dei diretti vantaggi dell'applicazione dei modelli esposti.

Si può considerare come forse uno dei benefici più apprezzati dai terminalisti per il potenziale effetto a catena che si può generare: la maggiore competitività sottintende un aumento dei traffici, grazie al quale aumenta la redditività del terminal così come i flussi di cassa e la conseguente possibilità di reinvestire nello sviluppo del terminal stesso. Nello specifico si osservano quali modelli di IA vengono proposti dagli autori e in che modo giovano alla competitività del terminal.

Nei casi in cui l'IA viene sviluppata con il compito di supportare le decisioni in sede di Berth Allocation Problem come nel modello proposto da *De León et al. 2017*, la competitività si esplica nella scelta efficiente di allocazione della nave alla giusta banchina. Un'organizzazione e disposizione ottimale di navi in banchina permette al terminalista di pianificare l'erogazione del servizio nella maniera più efficiente possibile riducendo, oltre ai costi come menzionato precedentemente, anche i tempi di servizio, due degli elementi fondamentali che rendono un terminal competitivo. Come sottolineato dagli autori, il DSS ottimizza l'assegnazione della banchina in modo da aumentare il turnover di navi che toccano il terminal, ma è essenziale che per rendere ciò possibile, anche il resto del sistema (la capacità in senso di spazio, la velocità di immissione delle merci nell'inland, il collegamento con altre modalità di trasporto, i servizi a valore aggiunto ecc.) sia in grado di operare in sincronia con ritmo congruente.

Quanto suggerito da *De León et al 2017*. è un buon punto di partenza per l'aumento della competitività del terminal, ma l'ottimizzazione del BAP è solo uno degli elementi sui cui si può intervenire con l'intelligenza artificiale. Ulteriori alternative prevedono la

riduzione dei tempi nelle operazioni di attracco, l'assegnazione delle quay cranes successiva all'allocazione della banchina e la formulazione delle relative sequenze di lavoro. *Ursavas et al. 2014* studiano un tool di intelligenza artificiale, il cui principio di funzionamento non si differenzia sostanzialmente dal DSS proposto per l'assegnazione della banchina, il quale però affronta l'insieme delle operazioni del terminal in maniera integrata con lo scopo del raggiungimento di un obiettivo di efficienza complessiva. Gli autori giustificano l'approccio dimostrando che procedere ottimizzando i singoli componenti del terminal isolatamente porta ad un risultato complessivo sub-ottimale. Il caso di studio osservato riguarda il terminal container del porto di Izmir in Turchia, per il quale è stata simulata l'applicazione del DSS in un orizzonte temporale di una settimana, durante la quale il supporto dell'IA ha permesso un aumento di erogazione giornaliera del servizio tra il 10% ed il 25%.

Un difetto fondamentale della maggior parte dei DSS proposti in letteratura per l'ottimizzazione del BAP, CAP e CSP¹¹ consiste nella deviazione della priorità assegnata alle navi. Frequentemente, nella generazione della sequenza di navi da servire sono da considerare alcuni criteri sottintesi che portano le navi ad avere un grado di priorità diverso (come accordi commerciali tra nave e terminal o presenza di merce pericolose), criteri mutevoli e difficilmente convertibili matematicamente. Ad aggirare tale problema è un ulteriore DSS sviluppato da *Pratap et al. 2017*, il quale non elimina completamente la deviazione dalla scala di priorità ma è in grado di minimizzarlo, garantendo un servizio equo e rispettoso degli accordi contrattuali stipulati con i clienti.

In generale, come dimostrato da *Ngai E. W. T. et al. 2011*, intelligenze artificiali che monitorano in tempo reale le operazioni del terminal e che supportano l'attività umana portano i clienti a sviluppare un maggiore senso di fiducia e di soddisfazione nei confronti dei servizi offerti dal terminalista, aumentandone così ulteriormente la competitività.

Diversi modelli di IA studiati in letteratura vengono concepiti con l'obiettivo di prevedere i possibili sviluppi delle rate di nolo sul mercato marittimo e dei conseguenti traffici. Tali intelligenze artificiali vedono come utenti target armatori, noleggiatori e caricatori, ovvero i soggetti il cui rendimento dipende strettamente dall'andamento sul mercato delle rate di nolo. Alcuni autori hanno però derivato un'utilità di suddette intelligenze artificiali

¹¹ BAP = berth allocation problem (o problema dell'assegnazione delle banchine), CAP = crane allocation problem (o problema dell'assegnazione delle gru), CSP = crane scheduling problem (o problema della schedulazione delle gru)

anche in ambito portuale, grazie alla capacità di previsione dei traffici di navi che andranno, con una certa probabilità, a toccare i porti presi in esame. *Duru et al. 2012* propongono uno dei numerosi modelli di previsione delle rate di nolo: Il caso di studio osservato consiste nell'applicazione del metodo fuzzy-DELPHI per la correzione delle previsioni statistiche sul mercato del trasporto marittimo dry bulk, con particolare riferimento al Baltic Dry Index¹² (BDI). Lo studio empirico viene condotto con la collaborazione di 11 esperti del settore del noleggio e della gestione delle navi, ai quali viene chiesto di definire un aggiustamento alle previsioni statistiche di riferimento utilizzando le proprie conoscenze del settore. Questi aggiustamenti vengono poi trasferiti negli insiemi fuzzy corrispondenti, e il risultato netto è stato calcolato come centroide dell'insieme fuzzy medio finale. Il periodo di previsione considerato nell'analisi empirica è stato dal novembre 2009 al maggio 2010, con una media mensile di nolo. I risultati hanno mostrato che l'aggiustamento fuzzy-DELPHI ha migliorato significativamente l'accuratezza delle previsioni rispetto ai modelli puramente statistici, portando ad una riduzione dell'errore di previsione del 30-40%. L'andamento, anche nel breve termine, delle rate di nolo permette di capire quale tendenza sta seguendo il mercato. Noli alti porteranno gli armatori a voler sfruttare il momento ciclico di picco al meglio possibile, navigando con velocità maggiore per effettuare più viaggi, accettando carichi più ridotti, cercando di ridurre al minimo le soste in porto e in alcuni casi immettendo sul mercato navi nuove o navi precedentemente in disarmo. Fenomeni di questo tipo hanno chiaramente un riflesso sui terminal e sulla loro attività; un armatore che intende sostare in porto il minor tempo possibile sarà disposto ad accettare tariffe portuali maggiori pur di ricevere un servizio rapido. Inoltre, conoscere i possibili sviluppi commerciali futuri permette al terminalista di inquadrare l'evoluzione nel breve e medio termine dei propri flussi di cassa in conseguenza del maggior o minor numero di navi da servire, fornendo così un significativo supporto nella pianificazione e programmazione terminalistica aumentandone la potenziale competitività.

¹² Baltic Dry Index: indice di nolo quale media ponderata di quotazioni date da una serie di broker sul dry; include rotte e size navali diverse e si compone di quattro sottoindici:

BCI – baltic capesize index

BPI – baltic panama index

BSI – baltic supramax index

BHSI – Baltic handysize index

Rimanendo in ambito commerciale alcuni strumenti di intelligenza artificiale hanno un ruolo nell'assistere operatori marittimi nella negoziazione di condizioni contrattuali con altre controparti. Strumenti di questo tipo, come quello sviluppato da *Rau H. et al. 2006* basato sull'algoritmo dell'NDF (funzioni di negoziazione e decisione), assiste l'utente nella migliore comprensione della controparte, apprendendone le preferenze e adottando conseguenti strategie di negoziazione più appropriate. Si tratta di un modello unbiased, il cui scopo non è quello di avvantaggiare una sola delle due parti, bensì di fungere da vero e proprio intermediario e giovare in egual modo tutti i soggetti coinvolti ricercando la soluzione contrattuale migliore vicino all'ottimo di Pareto. Dal punto di vista del terminal ciò si traduce nella possibilità di intrattenere in maniera più fluida e soddisfacente rapporti commerciali con i propri clienti.

Nei terminal in cui viene offerto il VAS di magazzinaggio, si assiste in momenti di picco alla creazione di colli di bottiglia derivanti proprio dal magazzino e dalla capacità limitata nella gestione di un eccessivo numero di ordini in tempi ristretti. Il motivo per cui un terminal offre uno o più VAS è proprio di quello di aumentare la competitività della propria posizione sul mercato, per cui quando il servizio stesso diventa fonte di inefficienza l'effetto della competitività raggiunta viene troncato. *Li Z. et al (2020)* affrontano il problema individuando la soluzione nell'implementazione di sistemi intelligenti di gestione del magazzino integrati da agenti robot come menzionato nel capitolo "VI.1. La riduzione dei costi". Grazie alle caratteristiche di adattabilità all'ambiente e alla flessibilità di impiego l'IA sviluppata dagli autori dimostra di poter portare i magazzini nel terminal, tendenzialmente caratterizzati da rigidità, ad adattarsi rapidamente a cambiamenti dinamici della domanda.

Un ulteriore strumento in grado di aumentare la competitività di un terminal, anche se non rivolto ad un settore specifico, riguarda tutti i fornitori di un servizio e si tratta di intelligenza artificiale applicata al customer service. "*Estimating the Impact of 'Humanizing' Customer Service Chatbots*" di *Schanke et al. 2016* esamina l'impatto dell'antropomorfismo nei chatbot per il servizio clienti precedente alle transazioni. I ricercatori hanno collaborato con un rivenditore di abbigliamento usato negli Stati Uniti per automatizzare il processo di acquisto di indumenti usati utilizzando un chatbot su Facebook Messenger. Il caso di studio randomizza l'esposizione dei consumatori a diversi livelli di antropomorfismo nei chatbot, incorporando tre feature: umorismo, ritardi nella

comunicazione e presenza sulla piattaforma. I risultati mostrano che l'antropomorfismo migliora le probabilità di buon esito nelle vendite, aumentando la sensibilità degli utenti all'offerta. Secondo gli autori ciò è da ricondurre al fatto che, rendendo i chatbot più simili a umani, i consumatori adottano una mentalità di valutazione più equa e più propensa alla negoziazione. Inoltre, l'antropomorfismo potrebbe aumentare la disponibilità dei consumatori a condividere un maggior numero di informazioni necessarie per completare la transazione. L'implementazione di chatbot intelligenti nel customer service del terminal potrebbe dunque portare agli stessi vantaggi evidenziati nello studio nel rapporto con i clienti, incrementando così possibilmente il grado di competitività del terminal. Nella scelta del terminal a cui rivolgersi, l'armatore effettua la decisione secondo una serie di criteri che possono variare a seconda del soggetto interessato. È però comune che uno dei principali criteri di scelta consista nella sicurezza offerta dal porto in termini di misure e procedure adottate per garantire l'incolumità dei mezzi e delle persone. Le politiche adottate e gli strumenti utilizzati rappresentano dunque un'importante fonte di differenziazione e di competitività; gli strumenti offerti dalla letteratura vengono analizzati nel capitolo dedicato.

IV.4.4. La pianificazione operativa

A prescindere dal modello di base utilizzato, l'intelligenza artificiale presenta, nella maggior parte dei casi, il vantaggio della capacità previsionale. In un ambito incerto e soggetto a variabili endogene ma soprattutto esogene come quello marittimo portuale la possibilità di prevedere lo sviluppo dell'attività e degli elementi che hanno impatto su di essa diventa un'essenziale fonte di vantaggio competitivo. Un simile vantaggio non va a beneficiare i soli terminalisti ma anche operatori marittimi di diversa natura come armatori e autorità portuali.

Si pensi per esempio, nel caso degli armatori, al modello IA già trattato proposto da *Besikçi et al. 2016* per la previsione del consumo di carburante da parte dell'asset nave. Un armatore, la cui attività prevede notoriamente di trovare il giusto equilibrio tra capacità di stiva venduta e totalità dei costi da sostenere, trarrebbe grande beneficio dalla possibilità di costruire budget al meglio allineati con quanto successivamente riportato a

consuntivo permettendo una pianificazione dei viaggi e dei relativi costi più accurata. Al di fuori dei costi altri strumenti di intelligenza artificiale, come elaborato da *Zaman et al. 2014*, sono in grado individuare, definire e prevedere l'entità di possibili rischi che si possono manifestare nello svolgimento dell'attività dell'armatore. Il caso di studio osservato tratta la valutazione dei rischi di collisione tra navi nello Stretto di Malacca, una via d'acqua cruciale per il commercio internazionale, per il quale transita circa il 40% del traffico marittimo globale. Lo stretto è considerato ad alto rischio per la navigazione, per cui la sicurezza marittima è un tema di forte rilevanza. L'articolo introduce un modello Fuzzy FMEA per identificare i pericoli e valutare i rischi di collisione delle navi ottenendo le informazioni dalla banca dati del sistema di identificazione automatica delle navi AIS (Automatic Identification System). Essere a conoscenza dei rischi delle singole tratte, della loro probabilità e della loro entità supporta il decisore nella scelta dei percorsi da effettuare a seconda del grado di avversione al rischio. Continuando in relazione all'attività dell'armatore, ma in ambito di charter and acquisition, la letteratura espone alcuni strumenti intelligenti di supporto nella scelta della nave in fase di acquisto o di noleggio. *Wibowo et al. 2012* presentano diverse metodologie per affrontare il problema della selezione della nave, quali la programmazione intera, il processo di analisi gerarchica (AHP) e l'integrazione di analisi commerciali con una combinazione di AHP e TOPSIS¹³. Tuttavia, approcci simili necessitano di un eccessivo sforzo computazionale a causa della difficoltà di elaborazione data, in casi più complessi, dal numero di alternative e di criteri di scelta da rispettare. Il sistema di supporto decisionale intelligente integrato è dunque progettato per facilitare il processo di valutazione e selezione delle navi, grazie ad una piattaforma interattiva che permette ai decisori di esprimere le proprie preferenze in modo linguistico¹⁴ e di esplorare le implicazioni delle diverse scelte. Proseguendo nell'interesse degli armatori, l'intelligenza artificiale trova applicazione, secondo quanto riportato dalla letteratura, anche nell'attività di manutenzione della nave. Trattandosi di un'attività prettamente materiale è implicito l'utilizzo della robotica come proposto da *Le A. V. et al. 2021*. L'articolo elaborato "*Towards optimal hydro-blasting in reconfigurable climbing system for corroded ship hull cleaning and maintenance*"

¹³ TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

¹⁴ Molte intelligenze artificiali, come quelle usate comunemente, sono in grado di elaborare i dati necessari per il loro funzionamento estraendoli da input espressi in linguaggio corrente, evitando così la necessità di fornire allo strumento dati numerico-matematici

elaborato dagli autori prevede la programmazione di robot a presa magnetica da applicare allo scafo della nave, il cui funzionamento è dettato dalla cosiddetta Rete Neurale Convolutionale Profonda (DCNN). Lo scopo con cui viene concepita tale IA, oltre a quello di pulizia dello scafo, è quello di valutare le condizioni delle lamiere dello stesso e della relativa corrosione per essere in grado di pianificare al meglio le operazioni di messa in bacino. Molti armatori, infatti, procedono alla manutenzione e alla pulizia nonché sostituzione della lamiera in modo cadenzato, secondo periodi prefissati, anticipando tuttavia così l'eventuale fine di vita utile dei materiali. Poter pianificare il momento di investimento in tale tipo di manutenzione sull'effettiva condizione dello scafo, il cui controllo prevede tradizionalmente l'ingaggio di sommozzatori specializzati ed il conseguente esborso, ottimizza non solo l'uso di materiali ma anche i costi.

I tool intelligenti forse più rilevanti, che rappresentano però come esplicito in letteratura una vera e propria sfida nello sviluppo, riguardano la maggior parte degli operatori logistici trattandosi di strumenti volti all'ottima distribuzione di container (pieni e vuoti) lungo la catena logistica e dunque ad una pianificazione operativa integrata. Suddetta sfida deriva principalmente dal coordinamento di processi e obiettivi tra gli innumerevoli operatori di mare e di terra coinvolti (*Bandeira et al. 2009*).

La particolarità dello stato attuale degli strumenti di intelligenza artificiale applicati al framework portuale è data dal fatto che i DSS proposti vengono sviluppati sulla base di casi di studio specifici. Questo comporta due implicazioni principali: in primo luogo i DSS e la loro struttura dipendono strettamente dalle condizioni del caso di studio utilizzato per lo sviluppo e secondariamente è probabile che ciò si traduca in una bassa versatilità di utilizzo del singolo DSS rispetto ad altri casi. La realtà dei fatti, però, prevede che i DSS intelligenti studiati siano progettati per essere utilizzati in scenari operativi analoghi al caso di studio sottostante e che, qualora ci fosse insufficiente congruenza tra strumento di IA e caso di applicazione, gli utenti abbiano la possibilità di personalizzare i parametri del DSS in base alle condizioni di contesto (*Ursavas et al. 2014*).

A poter beneficiare di una più efficace pianificazione operativa è anche la manodopera del terminal. Come nel caso studiato da *Ngai et al. 2011*¹⁵, ogni qualvolta un'attività o il

¹⁵ Il caso di studio si occupa della ricerca e dello sviluppo di un prototipo di sistema intelligente di tipo "context-aware" per il supporto alle decisioni (ICADSS) per il monitoraggio in tempo reale delle operazioni in un terminal container di Hong Kong. Il sistema utilizza la tecnologia di reti di sensori ubiqui (USN)

suo monitoraggio vengono affidati a tool intelligenti, la relativa manodopera viene rilasciata. La letteratura insiste che poter ripianificare l'impiego di forza lavoro in attività più strategiche rappresenti un beneficio per i lavoratori stessi, è però esposto a dibattito dall'inizio dell'automazione industriale quanto ciò sia effettivamente benefico a livello di benessere per la società. Di fatti, le prime automazioni, pensate per sostituire totalmente l'uomo e dare risposta a obiettivi di crescita economica e produttiva, hanno causato in molti casi un elevato costo sociale in termini di erosione del tasso occupazionale. Dal punto di vista del terminalista, tuttavia, si tratta di un effettivo risparmio sulla manodopera e di una più semplice pianificazione operativa, come evidenziato da *Tsolakis et al. 2022*. Questi ultimi studiano e simulano l'utilizzo di un sistema intelligente di AGV nel porto del Pireo, dimostrando benefici quali una significativa riduzione dei costi operativi (oscillando negli orizzonti temporali tra il 25% ed il 55%) e di un aumento di produttività (tra il 13% ed il 35%).

Il maggior vantaggio in termini di pianificazione dell'attività offerto dagli strumenti intelligenti studiati, consiste nella capacità di creazione di scenari "what if" e nelle analisi di sensibilità. Non si tratta di tecniche innovative, perché già utilizzate ampiamente in precedenza; il valore aggiunto dato dalla formulazione tramite intelligenza artificiale delle stesse consiste nella velocità e facilità di creazione. La capacità di processo della maggior parte dei DSS intelligenti studiati permette infatti la creazione di un alto numero di scenari precedenti una decisione di pianificazione, grazie ai quali diventa possibile valutare la robustezza di un piano operativo ricevendo informazioni sulle modalità con cui le soluzioni formulate si comportano e modificano in presenza di incertezza e variabili aleatorie (*Castilla Rodriguez et al. 2020*).

Min H. (2022) evidenzia in "*Developing a smart port architecture and essential elements in the era of Industry 4.0*" come l'introduzione di strumenti intelligenti tali da pianificare al meglio le operazioni portuali in un'ottica di massima efficienza rifletta i propri benefici lungo l'intera catena logistica. Un'architettura portuale fondata su sistemi informatici e digitali evoluti come quelli di intelligenza artificiale permetterebbe, in uno scenario ideale, di anticipare largamente possibili interruzioni di servizio per riformulare piani operativi di conseguenza o, ulteriormente, di rilevare anomalie e problemi (per

basate sullo strumento ZigBee per tracciare in tempo reale camion, gru di banchina e gru a portale (RTGCs) all'interno del terminal. Il tracciamento continuo di ogni singolo mezzo ottimizza la pianificazione delle movimentazioni dei container a banchina e piazzale.

esempio: necessità di manutenzione straordinaria) prima che si verifichino consentendo interventi tempestivi e garantendo la continuità dell'operatività.

IV.4.5. Il supporto decisionale

In letteratura è frequente l'utilizzo del termine Decision Support System (DSS) per riferirsi a strumenti intelligenti volti all'ausilio decisionale in senso generale. È da sottolineare come l'intelligenza artificiale non rappresenta l'unico strumento di supporto utilizzabile, ma si tratta sicuramente dell'alternativa più versatile ed impattante. I vantaggi che l'IA rappresenta variano ampiamente a seconda della particolarità del caso su cui si basa lo sviluppo del singolo sistema, ma alcuni di essi sono di utilità universale, come, per esempio, l'adattabilità a cambiamenti esogeni dell'ambiente come congestione e alterazioni meteorologiche (*Besikçi et al. 2016*). Il supporto decisionale fornito dall'IA non deriva necessariamente ed esclusivamente dall'interno, ma può trovare i propri input anche dall'esterno grazie a dati assorbiti da rapporti con fornitori, collaboratori, competitors e clienti. *Schanke et al. 2021* dimostrano ciò con l'analisi degli effetti dell'implementazione di chatbot antropomorfi volti alla gestione del customer service. Modelli di intelligenza artificiale, il cui fulcro risiede non nell'elaborazione matematica di dati ma nella capacità di apparire quanto più umano possibile, portano coloro che interagiscono con l'IA (in questo caso i clienti) a sviluppare un maggiore senso di fiducia ed una maggiore propensione alla condivisione di feedback relativi al servizio erogato rispetto invece ai casi in cui ciò si svolge su piattaforme interattive ritenute dai clienti eccessivamente meccaniche. Riuscire quindi ad instaurare un rapporto pseudo-umano con i clienti garantisce il reperimento di informazioni più precise volte a migliorare il servizio offerto.

Se da un lato uno degli aspetti maggiormente apprezzati dell'intelligenza artificiale moderna consiste la comprensione di input espressi in maniera linguistica e colloquiale, esistono ulteriori casi, in cui è preferibile che l'IA lavori direttamente con input numerici. Tradizionalmente, infatti, il decisore deve prima occuparsi della conversione delle grosse mole di dati in indici e trend, mansione che frequentemente richiede l'intervento di esperti dedicati. La possibilità di contare su un DSS intelligente, che attinge direttamente dai dati

grezzi per poi fornire versioni aggregate ed elaborate dei risultati, alleggerisce significativamente il processo decisionale ed elimina la necessità di includere l'ausilio di esperti (Bulut et al. 2011). La decisione che nel contesto portuale ha probabilmente la maggiore necessità di un sistema di supporto consiste nel calibrare il numero di contenitori pieni e vuoti da mantenere nel terminal per bilanciare domanda e offerta e garantire al contempo un buon livello di servizio e di efficienza. Banderia et al. 2009 simulano l'utilizzo di un DSS da loro sviluppato in grado di bilanciare al meglio il numero ottimale di contenitori da possedere nel terminal. Il sistema tiene conto dei movimenti previsti dall'operatività ordinaria (Fig. 4.9) ed il risultato si tara sulla base di determinati criteri con pesi diversi individuabili dal decisore stesso, la cui priorità può essere modificata a seconda delle condizioni di contesto.

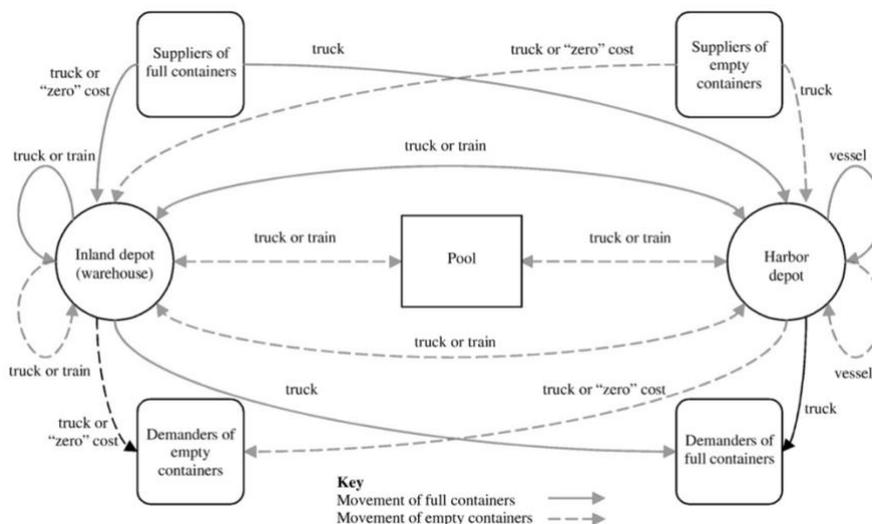


Fig. 1. Conceptual integrated model.

Fig. 4.9 – Schematizzazione del modello concettuale “A DSS for integrated distribution of empty and full Containers” – Bandeira et al. 2009

Il funzionamento alla base del supporto decisionale offerto dalle intelligenze artificiali non è da intendere come un meccanismo universale applicabile ad ogni realtà. Si fonda infatti sul principio dell'apprendimento autonomo, per cui la sua efficacia ed i criteri di decisione sono strettamente legati ai dati di input e al contesto di applicazione. Il supporto decisionale dato dal DSS studiato nel berth allocation problem (BAP) di De León et al. 2017, per esempio, tratta navi di tipo dry bulk e i criteri decisionali sono quindi basati su aspetti legati prettamente alla nave e alle caratteristiche della banchina e del carico

(materiali, dimensioni del lotto, dimensioni della nave, tipo di nave ecc.). Se la nave trattata fosse stata una portacontainer il terminalista avrebbe dovuto tenere conto di altri criteri come la velocità di scaricazione e inoltre sulle altre modalità di trasporto, la possibilità di presenza di merci pericolose o gli accordi commerciali con i caricatori ed armatori.

Nel prendere decisioni l'essere umano ha, rispetto ai mezzi informatici, un difetto fondamentale: il tempo di reazione. Nonostante le comunicazioni tra neuroni avvengano ad una velocità fino ad 1 KHz, il cervello umano presenta forti limiti nell'affrontare algoritmi non parallelizzabili. Oltre a ciò, le capacità cognitive umane sono ostacolate da soggettività e bias di diversa natura, per cui la velocità processuale non è minimamente paragonabile a quella dell'intelligenza artificiale. L'IA generalmente è autonoma e reagisce a cambiamenti esterni in tempo reale come dimostrato nel caso di studio di *"Improving the adaptability in automated vessel scheduling in container ports using intelligent software agents"* (Lokuge et al. 2007). Saper riadattare i piani e prendere decisioni conseguenti ad alterazioni delle condizioni operative in tempi brevi è ciò che può fare dunque la differenza in possibili situazioni di crisi per scongiurare la probabilità di congelamento dell'attività. Le decisioni alternative elaborate dagli strumenti di IA possono essere facilmente sottoposte ad una verifica di bontà effettuando analisi di sensibilità rispetto alle condizioni mutevoli dell'ambiente (Legato et al. 2018). È così sottinteso che l'ausilio di un sistema di supporto decisionale non consiste nella mera adozione di una soluzione proposta, bensì significa analizzare con criterio una serie di alternative fornite dal DSS. Tipicamente, per la natura del contesto marittimo portuale, si sceglie tra alternative che garantiscono un servizio qualitativamente maggiore ma una con un minor grado di robustezza (inteso come probabilità del progetto/investimento di perdurare nel tempo) e alternative qualitativamente peggiori ma più efficaci nel tempo; ciò dipende dalle condizioni operative e dalle risorse disponibili (Castilla Rodriguez et al. 2020).

Rivolgendo l'attenzione agli armatori, la letteratura presenta DSS dai quali possono trarre benefici anche i gestori delle navi nelle fasi decisionali. Poiché la gestione nave, ad eccezione dei momenti ciclici di picco del mercato, rappresenta generalmente un business con un basso ritorno di liquidità, per gli operatori della nave il supporto decisionale ideale mira al contenimento dei costi e al miglioramento delle prestazioni nonché alla vendita di

stiva. Tuttavia, precedente all'operatività della nave, ha luogo il processo di scelta della stessa. Per quanto la scelta dell'asset nave sia semplice dal punto di vista teorico, basandosi principalmente sul tipo di carico, dimensione dei lotti e tratte da percorrere, i criteri che l'armatore deve tenere in mente sono numerosi – riguardando la navigabilità tecnica, andamenti del mercato e comportamento dei concorrenti – e spesso in conflitto tra loro (Wibowo *et al.* 2012). Le decisioni nel contesto marittimo portuale sono di consueto irreversibili e rappresentano conseguenti movimenti ingenti di risorse finanziarie. Per questa ragione è necessario razionalizzare tali decisioni con il supporto di un'IA adeguata. Ne è un esempio il tool sviluppato da Yang *et al.* 2019 per il supporto agli armatori nelle decisioni di noleggio delle navi; con previsioni affidabili fornite dall' algoritmo intelligente, i proprietari di navi e i charterer possono razionalizzare le loro decisioni di noleggio, gestendo al meglio i rischi e sfruttando le relative opportunità di business.

Infine, anche in ambito di sicurezza i sistemi portuali possono beneficiare di intelligenze artificiali a supporto del PSC¹⁶. Chen C. H. *et al.* 2014 propongono uno studio sulla “consapevolezza situazionale marittima” e sulla sicurezza, che prevede l'utilizzo di strumenti di intelligenza artificiale per rilevare comportamenti o spostamenti anomali da parte delle navi che interessano il porto preso in esame. Il sistema GeMASS (GENetic algorithm knowledge discovery for MARitime Security System), si basa su un algoritmo genetico per il rilevamento delle anomalie in tempo reale estraendo input da più fonti dati, come il sistema di identificazione automatica (AIS), società di classificazione e sistemi di gestione di sicurezza portuale. L'obiettivo principale è migliorare la capacità dell'autorità portuale di identificare minacce marittime potenziali mediante l'analisi di grandi volumi di dati, un compito difficile e tedioso da eseguire manualmente. GeMASS impara dai dati e genera conoscenza aggiornata per rilevare in tempo reale navi che

¹⁶ Port State Control: “Attività ispettiva delle navi straniere da parte dell'Autorità dello Stato del porto atta a garantire che la nave che scala un porto in navigazione internazionale non sia in condizioni sub-standard rispetto alle Convenzioni Internazionali che regolano la sicurezza della navigazione, costituendo un pericolo per la vita umana in mare e per l'ambiente.

L'attività viene svolta da personale del Corpo, debitamente formato ed autorizzato quale ispettore PSC, dislocato tra i diversi Comandi territoriali ubicati nei porti maggiormente interessati da traffico mercantile ed organizzato in "Nuclei Port state Control" che fanno capo ai servizi di coordinamento PSC istituiti a livello di Direzione Marittima e ad un Coordinatore Regionale del servizio” - guardiacostiera.gov.it

rappresentano potenziali minacce creando una lista prioritizzata e innescando così le procedure di PSC.

IV.4.6. L'efficienza energetica

Nonostante l'efficienza energetica sia un tema la cui rilevanza ha assistito ad una forte crescita negli ultimi decenni, la letteratura studiata non la considera in maniera approfondita come ci si aspetterebbe, infatti l'argomento viene trattato in maniera collaterale in collegamento agli altri temi.

Un primo caso di studio che costituisce un esempio di ciò si riferisce all'argomento già trattato riguardante i Sistemi di Supporto Decisionale (DSS) progettati per ottimizzare il risparmio di carburante (*Besikçi et al. 2016*). Questa applicazione, particolarmente rilevante nel contesto della gestione nave, è di fondamentale importanza per gli armatori, in quanto consente di migliorare l'efficienza operativa durante l'intero ciclo di vita dell'impiego della nave. Attraverso l'utilizzo di tali sistemi, l'armatore può monitorare e ottimizzare in tempo reale le performance della nave, tenendo conto di variabili come il consumo di carburante, le condizioni meteo, le rotte di navigazione, e altre dinamiche operative, al fine di ridurre i costi e minimizzare l'impatto ambientale. L'enfasi dello studio, tuttavia, è posta sui benefici di una più precisa pianificazione operativa e della riduzione di costi operativi.

Più strettamente legato al sistema portuale è l'uso innovativo di mezzi autonomi, come descritto nello studio di *Tsolakis et al. (2022)*. I veicoli a guida automatica (AGV) presentati rappresentano appunto una soluzione tecnologica all'avanguardia per migliorare sia l'efficienza operativa sia la sostenibilità ambientale all'interno delle aree portuali, che rappresentano nodi cruciali nel commercio globale. L'efficienza energetica evidenziata nello studio deriva principalmente da due fattori principali. In primo luogo, si assume che questi AGV siano alimentati da motori ad energia elettrica, il che li rende una scelta ecologicamente sostenibile rispetto ai tradizionali veicoli alimentati a combustione. L'adozione di veicoli elettrici contribuisce non solo alla significativa riduzione delle emissioni di gas serra, ma anche a un abbattimento dell'inquinamento atmosferico ed acustico, elementi fondamentali per il miglioramento della qualità

dell'ambiente portuale e delle aree urbane circostanti. In secondo luogo, il fulcro di questi mezzi autonomi risiede nella loro capacità di operare in modo ottimizzato. Grazie a sofisticati sistemi di navigazione supportati da IA e da sensori avanzati, gli AGV sono in grado di determinare i percorsi più efficienti all'interno del porto, evitando movimenti inutili e riducendo drasticamente i consumi energetici. Questo comportamento ottimizzato non solo riduce il tempo necessario per il trasporto delle merci all'interno del porto, ma consente anche una migliore gestione del traffico portuale, minimizzando i rischi di congestione e migliorando in generale il flusso di lavoro ed i processi portuali. Inoltre, la capacità degli AGV di integrare dati in tempo reale sulle condizioni operative, come il posizionamento delle navi, le condizioni meteorologiche, e la disponibilità di spazi di carico, permette un'ulteriore riduzione dei tempi di inattività e un incremento dell'efficienza operativa.

Tra le numerose attività svolte nell'ambito del porto, molte delle quali caratterizzate da significativi sprechi di risorse e di tempo, particolare attenzione è da rivolgere alle operazioni di pulizia dello scafo delle navi e delle cisterne (qualora si trattino anche navi rinfusiere). Queste attività sono cruciali per garantire l'efficienza operativa degli asset nave e la sicurezza delle operazioni portuali, ma spesso comportano un uso di risorse maggiore rispetto al necessario, sia in termini di tempo che di materiali impiegati. La manutenzione regolare delle superfici soggette a corrosione, come lo scafo e le cisterne, è fondamentale per prevenire danni strutturali, migliorare le condizioni fisiche di navigazione della nave, e ridurre il consumo di carburante (uno scafo mantenuto al meglio ottimizza l'idrodinamicità). Tuttavia, i metodi tradizionali di pulizia e manutenzione possono essere inefficaci e dispendiosi se non gestiti in modo ottimale. In questo contesto, strumenti di IA possono svolgere un ruolo rivoluzionario nell'ottimizzare queste attività, rendendo la pulizia e la manutenzione più efficienti e meno dispendiose. L'IA, come proposto da alcuni autori, può essere utilizzata per analizzare grandi quantità di dati relativi allo stato delle superfici, come il livello di corrosione o l'accumulo di biofouling, per prevedere con precisione quando e dove è necessario intervenire. Questo approccio consente non solo di ridurre i tempi di inattività delle navi, ma anche di minimizzare l'uso di risorse come acqua, detergenti chimici, e l'energia necessaria per le operazioni di pulizia. Nel caso ideale l'IA applicata può essere integrata con sistemi robotici avanzati per automatizzare la pulizia, assicurando una maggiore precisione e

uniformità nel trattamento delle superfici, riducendo al contempo il rischio di errore umano. Un esempio concreto di come queste tecnologie possono essere sviluppate è illustrato nello studio di *Le A. V. et al. (2021)*, che esplora appunto potenziali applicazioni dell'IA nel campo della manutenzione navale. Lo studio mostra come algoritmi avanzati, in questo caso una Rete Neurale Convoluzionale Profonda (DCNN), possano essere utilizzati per monitorare in tempo reale lo stato delle superfici soggette a corrosione, ottimizzando così sia i tempi che le risorse necessarie per la manutenzione. L'adozione di tali tecnologie non solo migliora l'efficienza operativa, ma contribuisce anche a una gestione più sostenibile delle risorse portuali, riducendo gli sprechi e minimizzando l'impatto ambientale delle operazioni di manutenzione. Il robot utilizzato, denominato "Hornbill", opera in risoluzione del Travelling Salesman Problem, e negli esperimenti effettuati ha dimostrato di essere in grado di risparmiare in media il 15% di energia elettrica, il 26% di acqua ed il 5% di tempo. È facile considerare tali risultati come poco soddisfacenti, in alcuni casi potrebbero agli occhi dello stakeholder non giustificarne l'investimento, ma è fondamentale tenere conto di come questi risparmi si accumulano nel corso tempo e su flotte di più navi.

IV.4.7. La qualità

La qualità nel contesto portuale è un concetto in stretta correlazione con l'efficienza, l'affidabilità e la competitività di un porto nel soddisfare le esigenze degli stakeholder, quali armatori, operatori logistici, autorità portuali e clienti finali. In un quadro generale del commercio internazionale in cui l'interconnessione ed il dinamismo sono alla base della catena logistica moderna, la qualità dei servizi offerti dal porto diventa determinante per la capacità di attrarre traffico ed investimenti. È da rimarcare che la qualità nei servizi portuali non si limita alla mera rapidità ed efficienza di erogazione dei servizi di carico e scarico delle merci, ma comprende una vasta gamma di elementi, tra cui la sicurezza delle operazioni, l'affidabilità delle infrastrutture, la trasparenza nelle comunicazioni, la capacità di adattarsi a esigenze specifiche e la sostenibilità ambientale. Inoltre, in un ambiente altamente competitivo, la qualità dei servizi può influenzare significativamente la reputazione di un porto e la sua posizione nel mercato globale. Un aspetto essenziale

nella qualità dei servizi portuali è dato dall'adozione ciclica di tecnologie innovative volte all'efficientamento delle operazioni comprensivo di riduzione dei tempi e minimizzazione dei costi. Quando un porto riesce propriamente a offrire servizi di alta qualità in maniera affidabile e sostenibile, ne giova la soddisfazione del cliente e indirettamente anche la crescita economica del mercato circostante.

Sorge dunque spontanea la domanda, quali sono allora i modelli di intelligenza artificiale che possono incidere sulla qualità del servizio offerto? *Schanke et al. (2021)*, come sottolineato nel capitolo precedente, espongono l'efficacia dell'utilizzo di intelligenza artificiale nel servizio clienti, ponendo particolare enfasi sull'uso di chatbot nelle mansioni di front office. Quanto riportato dagli autori dimostra che, quando il grado di antropomorfismo, e quindi la capacità di simulare al meglio terminologia, sintassi e comportamenti umani, è elevato, i clienti sono portati ad una maggiore sensibilità all'offerta, causata da una percezione più coinvolgente e personale delle interazioni. I clienti analizzano dunque le offerte in modo critico e approfondito, un effetto particolarmente utile nei processi di formulazione di strategie di marketing e di vendita dato che, come dimostrato dallo studio, l'interazione pseudo-umana può influenzare positivamente la decisione di acquisto e la fidelizzazione del cliente.

In un contesto, in cui la qualità del servizio è strettamente correlata alla velocità di erogazione, la possibilità di reagire in tempo reale a cambiamenti nell'ambiente è una prima fonte di vantaggio competitivo (*Bandeira et al. 2022*). È altrettanto fondamentale, tuttavia, essere in grado di ridurre l'incertezza dove possibile. La gestione dell'incertezza, in un settore soggetto a variabili aleatorie come quello marittimo portuale, richiede un approccio complesso capace di oltrepassare i limiti delle tradizionali tecniche analitiche. Saper includere l'incertezza nei modelli matematici di supporto è una competenza fondamentale ma non immediata, considerando l'imprevedibilità del comportamento umano e le dinamiche del mercato marittimo. Si identifica così nei sistemi fuzzy¹⁷ una componente fondamentale per la ricostruzione matematica di suddetta incertezza, poiché si tratta di sistemi pensati per includere nella formulazione dei risultati variabili

¹⁷ I sistemi fuzzy permettono la creazione di modelli anche quando le informazioni di base sono incerte, ambigue o incomplete, creando così modelli più rappresentativi dell'aleatorietà reale del contesto. Attraverso l'utilizzo di sistemi fuzzy, i decisori possono sostenere i propri processi decisionali con modelli più accurati in modo da prevedere variabili soggette a oscillazioni come la domanda di mercato, l'andamento dei prezzi e possibili trend futuri.

probabilistiche e stocastiche come evidenziato nello studio di *Duru et al. (2020)*. Nel caso di studio gli autori sviluppano un modello di inclusivo di un algoritmo fuzzy-DELPHI volto alla previsione dell'andamento del mercato dei noli applicato al mercato del dry bulk, nello specifico lo scopo consiste nella previsione dello sviluppi dei valori del BDI¹⁸. Poter contare su DSS tali da avere un significativo supporto nella gestione dell'incertezza e quindi nella possibilità di offrire ai propri clienti e collaboratori risultati certi, si traduce in una maggiore qualità percepita e in una conseguente fonte di vantaggio rispetto ai concorrenti.

Le attività portuali fanno parte di un settore complesso e fortemente regolamentato, per cui col tempo sono state formulate procedure standard per garantire l'efficienza e la sicurezza delle operazioni. La standardizzazione interessa, infatti, operazioni che spaziano dal semplice carico e scarico merci, alla gestione del traffico negli specchi d'acqua interni al porto, fino alla manutenzione delle infrastrutture stesse. Lo scopo della standardizzazione è quello, in primo luogo, di efficientare le operazioni diminuendo la necessità di supervisione e controllo e secondariamente di ridurre al minimo rischi di errori o incidenti, formando al meglio gli operatori e individuando i relativi compiti e responsabilità. Tuttavia, gli operatori, per la natura aleatoria del settore, si trovano spesso ad affrontare scenari imprevisti e istanze difficilmente gestibili tramite procedure standard (per esempio: picchi nei traffici, emergenze sanitarie, condizioni meteorologiche straordinarie ecc.). “*A Machine Learning-based system for berth scheduling at bulk terminals*” di *De León et al. (2017)* evidenzia l'importanza dell'adozione di un sistema di supporto decisionale in grado di formulare soluzioni a supporto di ciascun possibile scenario. Gli autori dello studio sviluppano un'IA pensata per garantire l'ottimale allocazione di banchine in un terminal rinfusiere a fronte di scenari diversi, quale, per esempio, un improvviso aumento dei traffici e della conseguente domanda. Un simile DSS implica la capacità di analizzare in tempo reale una moltitudine di variabili, fornendo al decisore i dati e risultati adeguati a prendere decisioni tempestive e precise in modo da garantire la sicurezza, la continuità e la qualità derivante del servizio.

¹⁸ Baltic Dry Index: media ponderata di quotazioni di noli date da una serie di compagnie di brokeraggio. Il BDI è comprensivo di quattro sottoindici specifici per size navale:
BCI – baltic capesize index - 4 T/C e 5 voyage charter
BPI – baltic panama index - 4 //C
BSI – baltic supramax index - 6 T/C
BHSI – Baltic handysize index - 6 T/C

La qualità e la bontà delle soluzioni offerte dagli strumenti di intelligenza artificiale sono legate alla diversità e alla quantità di fonti da cui i sistemi IA attingono i dati di input. Tipicamente l'ampiezza delle fonti dati è ciò che permette all'IA di formulare analisi precise e decisioni ponderate. In ambito portuale le fonti dati più frequenti consistono nei sistemi di identificazione automatica delle navi (AIS) per quanto concerne informazioni sulla posizione della navi in arrivo, la velocità e la tratta delle stesse, le società di classificazione per le informazioni sulle condizioni di navigabilità, sicurezza e conformità normative e tecniche della singola nave ed infine nei sistemi di gestione portuale (Port Management Systems) per i dati relativi ai flussi di container, coordinamento dei mezzi di movimentazione e pianificazione delle operazioni di carico e scarico merci. *Chen C. H. et al. (2014)* trattano il tema delle fonti dati per i tool IA applicati all'ambito portuale per la gestione della sicurezza e la rilevazione di anomalie e sottolineano l'importanza, soprattutto in ambito di sicurezza, della molteplicità di fonti dati volta alla massima validità dei risultati offerti dai modelli intelligenti. La combinazione di origine dei dati consente all'intelligenza artificiale di sviluppare una visione olistica delle operazioni portuali e, oltre alla maggiore precisione delle decisioni operative, di migliorare la capacità previsionale a lungo termine contribuendo così non solo all'aumento della qualità del servizio offerto ma anche a una pianificazione strategica più efficace.

Ogni volta che il modello di intelligenza artificiale applicato apporta al sistema portuale dei vantaggi in termini di tempistiche, i benefici non si limitano all'efficientamento delle operazioni, bensì si riflettono anche sulla qualità percepita dal cliente. I tempi sono riducibili su una molteplicità di fronti: dalla minimizzazione degli scartaggi a piazzale (*Maldonado et al. 2019*) all'ottima allocazione delle banchine (*Ursavas et al. 2014*) alla formulazione dell'ordine di servizio delle navi (*Lokuge et al. 2007*). Quando uno strumento di intelligenza artificiale riesce a ottimizzare le operazioni di carico e scarico o a prevenire possibili ritardi dovuti ad una scarsa gestione delle risorse, la nave viene liberata dalla sosta in porto più rapidamente, generando un risparmio di costi anche per l'armatore, il quale, oltre a non sopportare spese aggiuntive legate alla permanenza in banchina, può massimizzare l'utilità di impiego della nave e la conseguente produttività della flotta. Al contempo, per il terminalista, essendo in grado di servire le navi con maggiore efficienza e rapidità a parità di orizzonte temporale, diventa possibile servirne un numero maggiore e ciò innesca un effetto a catena di benefici, quali un susseguente

aumento di produttività del terminal, una maggiore qualità percepita, la quale rende il porto agli occhi dei clienti più competitivo e infine maggiore redditività e relativi flussi di cassa che forniscono al terminalista i fondi necessari per poter reinvestire nella propria attività. *Ngai E. W. T. et al. (2011)* precisano inoltre che uno degli effetti finali della catena di benefici innescata dalla riduzione dei tempi di servizio è identificabile nel minor utilizzo di risorse, inteso come minori tempi di impiego delle immobilizzazioni, ovvero un vantaggio che può avere riflessi indiretti sulle tariffe esercitate, le quali possono essere ridotte rendendole più competitive ma mantenendo al contempo un giusto grado di marginalità.

Oltre alla valenza tecnica dell'erogazione dei servizi portuali, è fondamentale considerare un ulteriore aspetto essenziale: la gestione dell'informazione. In un contesto complesso e dinamico come quello portuale diventa essenziale per un soddisfacente svolgimento delle operazioni gestire strategicamente le informazioni generate da navi e carico. Il sistema di supporto utilizzato per ridurre l'effettiva complessità delle informazioni ha un forte impatto sulla specificità delle competenze richieste al decisore, per cui è opportuno che venga utilizzato il giusto DSS per evitare inefficienze ed errori in fase di analisi. *Yang Z. et al. (2019)* sostengono che l'informazione è ad oggi uno dei beni più preziosi nella gestione strategica e il giusto utilizzo della stessa può determinare il successo o fallimento di un'impresa. La capacità di sfruttare efficacemente l'informazione ha un impatto diretto sulla competitività del porto e sulle relazioni con i clienti. Le aziende che operano nel settore marittimo portuale o in connessione allo stesso si aspettano un flusso di informazioni chiaro e costante, per cui un porto in grado di fornire informazioni elaborate, accurate e tempestive riguardo allo stato delle operazioni e delle merci in transito è considerato come più affidabile e sicuro, migliorando la qualità percepita dai clienti. Per questo motivo, a fronte dello stato attuale della tecnologia e della crescente complessità che caratterizza i flussi informativi, la scelta più saggia per il terminalista consiste nell'investimento in DSS intelligenti pensati esattamente per alleggerire il carico cognitivo del decisore nell'elaborazione delle informazioni.

Ciò che l'IA, per la sua natura, è capace di fare significativamente meglio dell'essere umano è lavorare in costante considerazione dell'insieme, del quadro generale del contesto esaminato. In *“Developing a risk-informed decision-support system for earthquake early warning at a critical seaport”* di *Cremen et al. (2022)* sottolinea infatti

come un'IA efficace elabora le proprie soluzioni tenendo conto delle numerose interdipendenze degli elementi che compongono il sistema porto. Nel caso studiato, per esempio, gli autori elaborano un tool di IA volto alla formulazione di politiche di sicurezza per affrontare il problema delle scosse sismiche nel porto di Gioia Tauro e all'attivazione di allarmi in grado di anticipare il verificarsi di un terremoto. I criteri che l'intelligenza artificiale deve soddisfare nel caso di studio sono numerosi, interconnessi e in alcuni casi in contrasto tra loro (continuità di servizio, investimenti in impianti di sicurezza, contenimento dei costi, preservazione della sicurezza e vita umana ecc.).

IV.4.8. La sicurezza

Un ulteriore vantaggio riscontrato nello studio della letteratura è quello della possibilità di aumentare la sicurezza. Nei porti, l'intelligenza artificiale può svolgere un ruolo cruciale nel migliorare la sicurezza in senso di safety e security in un ambiente notoriamente complesso e rischioso. Tra gli strumenti proposti sono infatti frequenti sistemi avanzati di monitoraggio, grazie ai quali IA può rilevare anomalie nelle operazioni portuali in tempo reale, prevenendo incidenti e riducendo il rischio per i lavoratori.

Specifiche aree dei porti, come canali di navigazione e zone di transito, sono particolarmente soggette a un elevato rischio di collisione, la cui causa risiede quasi esclusivamente nell'errore umano. La complessità quale combinazione di traffico navale intenso, condizioni meteorologiche mutevoli e spazi limitati aumenta il margine di rischio in queste aree. Sebbene la guida autonoma delle navi rappresenti una soluzione in fase di sviluppo, l'intelligenza artificiale può giocare già oggi un ruolo determinante nel supporto decisionale. L'IA è in grado di monitorare in tempo reale i dati su traffico, condizioni ambientali e rotte delle navi, fornendo analisi accurate dei rischi. Questo consente, per esempio, all'armatore o al comandante di ricevere raccomandazioni su quale canale di transito scegliere, basate su una valutazione approfondita e continua delle variabili in gioco. L'efficacia di potenziali sistemi di supporto decisionale è illustrata nel caso di studio condotto da *Zaman et al. (2014)*, dove l'IA sviluppata viene impiegata per valutare il rischio di collisione tra navi nello Stretto di Malacca, una delle rotte marittime più trafficate al mondo. Utilizzando un modello Fuzzy, l'IA analizza i dati provenienti

dall'Automatic Identification System (AIS), per ottenere informazioni in tempo reale sulla posizione, la rotta e la velocità delle navi. Il modello fuzzy permette di valutare in modo più accurato i rischi associati a ciascun transito, integrando molteplici fattori come le condizioni ambientali, il traffico e il comportamento umano. In situazioni caratterizzate da fitto traffico, come nello Stretto di Malacca, dove gli errori umani possono portare rapidamente a incidenti, l'IA ha effettivamente fornito un supporto decisionale efficace per evitare collisioni.

Oltre alla gestione della propria sicurezza da parte di armatori e altri operatori privati, l'intelligenza artificiale può avere un ruolo fondamentale nel controllo e nella supervisione da parte delle autorità marittime. Un esempio significativo è rappresentato dal modello "*GeMass*" sviluppato da *Chen C. H. et al. (2014)*. Questo sistema di IA è progettato per supportare le funzioni di Port State Control (PSC), attingendo dati da una serie di fonti diverse, come i registri di navigazione, il traffico AIS e le informazioni meteorologiche. Il vantaggio di modelli volti ad aspetti di safety e security come *GeMass* risiede nella loro capacità di elaborare grandi quantità di dati, integrandoli in modo efficiente per ricostruire profili dettagliati e accurati di ogni nave in arrivo o in partenza. Attraverso questa analisi, il sistema è in grado di identificare potenziali anomalie nei comportamenti delle navi, come deviazioni nelle rotte programmate, discrepanze nei dati operativi o possibili segnali di problemi tecnici. Ciò funge da supporto alle autorità per eseguire controlli mirati e tempestivi, migliorando l'efficienza delle ispezioni e riducendo il rischio di incidenti o violazioni delle norme. L'IA non solo facilita quindi il lavoro delle autorità portuali, ma aiuta a troncare al nascere eventuali pericoli associati a navi con storici di manutenzione insufficienti o che non rispettano le normative di sicurezza internazionale, rendendo i porti più sicuri e meglio gestiti.

L'utilizzo di intelligenza artificiale robotizzata, come nel caso del modello "*Hornbill*" sviluppato da *Le A. V. et al. (2021)*, ha dimostrato un impatto significativo sulla sicurezza tecnica delle navi, soprattutto in ambito di manutenzione. *Hornbill* è un sistema robotico avanzato progettato per eseguire ispezioni e interventi di manutenzione in modo autonomo, attraverso l'utilizzo di sensori avanzati e algoritmi di apprendimento automatico, l'IA di *Hornbill* è in grado di rilevare anomalie tecniche con un livello di precisione molto superiore ai metodi tradizionali. Questo consente di prevenire guasti potenzialmente gravi prima che possano verificarsi, migliorando la sicurezza operativa

complessiva della nave. Una manutenzione più precisa e predittiva equivale direttamente a una maggiore sicurezza, eliminando la possibilità di problemi nascosti che potrebbero passare inosservati durante le ispezioni manuali. L'IA, in questo caso, è anche in grado di eseguire analisi continue sui dati raccolti dai sensori installati a bordo, fornendo avvisi in tempo reale su eventuali malfunzionamenti o esigenze di manutenzione. Questo sistema, inizialmente concepito con l'obiettivo di ottimizzare i tempi di manutenzione, non solo riduce il rischio di incidenti dovuti a problemi tecnici, ma migliora l'efficienza operativa della nave garantendo che sia sempre in condizioni ottimali per affrontare le condizioni marine.

Infine, è opportuno affrontare il problema della sicurezza portuale in relazione alla protezione contro fenomeni naturali. Sebbene l'intelligenza artificiale non possa eliminare il verificarsi di tali eventi, essa può svolgere un ruolo chiave nella valutazione degli impatti potenziali, permettendo di quantificare il rischio e di sviluppare politiche di mitigazione efficaci. Un esempio è fornito da *Cremen et al. (2022)*, che sviluppano un sistema di allarme precoce per terremoti, denominato *Earthquake Early Warning (EEW)*, basato sul caso di studio del porto di Gioia Tauro. Questo sistema di IA utilizza dati sismici e modelli predittivi avanzati per rilevare precocemente i segnali di un terremoto imminente, consentendo di allertare le autorità portuali e i lavoratori in tempo utile per prendere misure preventive. Il supporto fornito dal sistema dell'Earthquake Early Warning aumenta significativamente la sicurezza delle infrastrutture portuali, poiché permette di attivare tempestivamente protocolli di emergenza per ridurre i danni strutturali e proteggere la vita dei lavoratori. Per esempio, l'IA può indicare in tempo reale quali aree del porto potrebbero essere maggiormente colpite e consentire l'evacuazione delle zone più a rischio, limitando le perdite e migliorando la capacità di risposta delle squadre di emergenza. In questo modo, l'intelligenza artificiale non solo contribuisce alla protezione delle infrastrutture fisiche, ma supporta anche le decisioni strategiche delle autorità portuali, facilitando lo sviluppo di politiche di gestione del rischio più efficaci e preservando la sicurezza pubblica in situazioni di disastri naturali.

IV.5. Gli ostacoli all'implementazione dell'IA in ambito portuale

Nonostante i benefici apportati dalla possibile diffusione dell'intelligenza artificiale in porto siano significativi, è ragionevole aspettarsi che vi siano ostacoli altrettanto rilevante che tutt'ora rallentano l'adozione di tale innovazione. In letteratura suddetti ostacoli vengono presentati in maniera più implicita, poiché nella maggior parte degli articoli lo scopo è proprio quello della promozione del modello di IA sviluppato e studiato dagli autori. Come nel caso dei benefici analizzati finora, anche gli ostacoli sono spesso condivisi dagli autori, ottenendo maggiore o minore attenzione a seconda della rilevanza degli stessi. In Fig. 4.10. è riportata la frequenza con cui ogni ostacolo viene affrontato in letteratura:

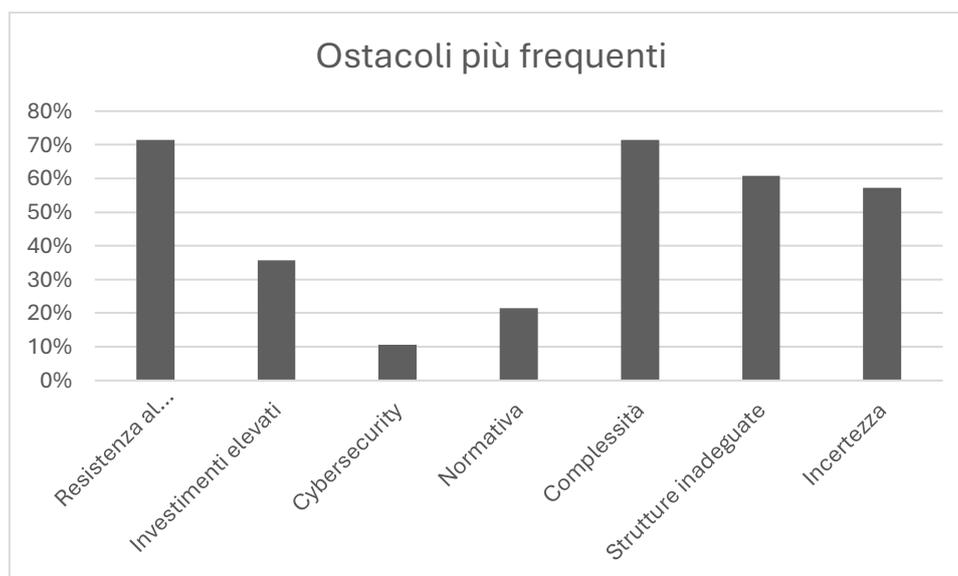


Fig. 4.10 - Frequenza in letteratura degli ostacoli all'adozione dell'IA in ambito portuale

IV.5.1. La resistenza al cambiamento

Nel tentativo di introduzione di un'innovazione dirompente su un mercato è comune scontrarsi con resistenza da parte degli operatori già affermati a causa dei cambiamenti che tale innovazione porterebbe ai propri business. Ciò è dovuto al fatto per cui, anche se

una nuova tecnologia promette importanti benefici in termini di efficienza e/o competitività, le persone all'interno delle organizzazioni si trovano di fronte ad un senso di disagio e di dissonanza quando vengono spinte a cambiare metodi, competenze e pratiche già da tempo consolidate. Non ha a che fare con una mera componente comportamentale psicologica causata dalla mancata fiducia per una tecnologia ancora ignota, bensì anche con l'energia e risorse richieste dall'adozione stessa necessarie per cambiare i processi esistenti.

Besikçi et al. (2016) evidenziano nel loro articolo come il successo dei tool di intelligenza artificiale sia complicato da raggiungere a causa delle caratteristiche intrinseche dell'ambito marittimo e delle relative modalità operative quali frutto di numerosi decenni di tradizione; il cambiamento in questo settore si prospetta dunque arduo soprattutto per gli elementi culturali sviluppati col tempo. Riuscire a portare i diretti interessati, gli operatori portuali, a riconoscere gli effettivi benefici dell'adozione dell'intelligenza artificiale nella propria attività rappresenta un compito impegnativo, nonostante siano i soggetti maggiormente interessati, a causa del timore che una simile tecnologia richieda competenze tecniche di cui non dispongono. Altrettanto complesso è però riuscire a convincere gli stakeholder. Queste figure essenziali per il funzionamento delle singole componenti del porto, per il loro finanziamento e per la loro gestione strategica presentano obiettivi e percezione del rischio diversi rispetto agli operatori. Gli stakeholder sono abituati alla sicurezza data da metodi tradizionali di decision making e processi operativi consolidati, per cui il successo nell'adozione di un'innovazione in ambito marittimo portuale può solo avvenire se accompagnata da un approccio mirato e ben strutturato. Ciò si traduce in un'adeguata formazione degli stakeholder volta alla riduzione del divario tra le conoscenze degli stessi e le potenzialità offerte dall'IA, mettendo in luce tutti gli aspetti dell'innovazione che possono effettivamente giovare all'attività portuale (*Bulut et al. 2011*).

È però da riconoscere, nello scetticismo degli interessati, che non è possibile pensare al successo della diffusione di una tecnologia innovativa se si trascurano le risorse necessarie alla formazione e sviluppo delle competenze del personale. Secondo *Zaman et al. (2014)* è quindi necessario idealmente elaborare piani strategici rivolti agli operatori con lo scopo di aggiornare conoscenze e competenze delle persone che compongono le organizzazioni maggiormente interessate in modo tale da comprendere, adottare e

utilizzare al meglio i sistemi introdotti. Ovviamente un simile approccio è rivolto in maniera indiscriminata a tutti i livelli gerarchici della singola organizzazione, poiché uno sbilanciamento nella formazione può portare ad inefficienze nell'utilizzo della tecnologia o resistenze interne. Anche manager e autorità portuali devono essere formate per supervisionare e disciplinare propriamente l'implementazione dell'IA e per prendere decisioni strategiche informate e ponderate rispetto allo stato di tecnologia e processi. Quando il personale, oltre ad apprendere l'utilizzo dei nuovi strumenti, è portato a comprendere il valore strategico ed il proprio ruolo nella crescita dell'organizzazione, si trova ad essere più motivato all'adozione e meno propenso alla resistenza iniziale. *Bandeira et al. (2009)* si pongono il quesito per il quale, nei casi in cui il tool IA specifico prevede una diretta interazione col cliente, si dovrebbe investire nella formazione del cliente stesso. In questo senso si torna al discorso sulla resistenza da parte degli stakeholder, l'operatore deve valutare se investire risorse in un approccio di formazione mirato alla massimizzazione dell'efficacia della formazione e minimizzazione dell'impegno richiesto al cliente o se perdere eventualmente il cliente a causa delle resistenze esercitate da quest'ultimo.

Nel caso di determinati modelli di IA, come quello proposto da *Duru et al. (2012)* sviluppato per la previsione dell'andamento dei noli e dei relativi traffici, la bontà delle soluzioni offerte è in stretta correlazione con il consenso che la tecnologia ottiene sul mercato. Si tratta infatti di modelli i cui dati di input derivano dalla partecipazione degli operatori, come in questo caso dalle quotazioni dei noli offerte dagli utenti. Per questo motivo l'informazione che circonda la tecnologia ha un ruolo fondamentale nell'introduzione sul mercato per l'attrazione del massimo numero di utenti. Il valore di un'innovazione, come teorizzato dalla "legge di Metcalfe", è infatti proporzionale al quadrato del numero di utenti. Tra i vari ambiti coperti dalla letteratura alcuni risultano essere particolarmente complicati da penetrare, ovvero ambiti in cui la resistenza al cambiamento è ancora più sentita. "*Knowledge discovery using genetic algorithm for maritime situational awareness*" di *Chen C. H. et al. (2014)* ne è un esempio. Quando si tratta di sicurezza, come dimostrato dall'articolo, ci si scontra con una maggiore riluttanza ad adottare nuove tecnologie, particolarmente quando le tecnologie prevedono componenti di automazione. Ciò è giustificata da una resistenza di base verso la tecnologia dell'IA ritenuta da tanti ancora ignota amplificata però dal senso di incertezza

che si genera quando gli operatori immaginano di delegare attività che riguardano la sicurezza ed incolumità della loro organizzazione a sistemi in grado di prendere decisioni in autonomia. Inoltre, le autorità portuali sono spesso poco propense a modificare procedure consolidate per timore che l'introduzione di nuove tecnologie possa generare vulnerabilità o imprevisti che compromettano la sicurezza del porto nel complesso. La resistenza può derivare non solo dalle persone ma anche dalla normativa stessa, poiché le norme che regolano la sicurezza marittimo portuale sono state sviluppate e aggiornate col tempo in maniera rigorosa e richiedono altrettanto rigore nel rispetto degli standard imposti a livello internazionale. L'incompatibilità tra intelligenza artificiale e normativa marittimo portuale rappresenta un significativo ostacolo che viene trattato in un successivo capitolo dedicato.

Sin dagli albori delle prime automazioni la resistenza al cambiamento trova la sua origine da un timore che la collettività ha sempre espresso, ovvero la riduzione dell'occupazione. Si tratta di un argomento trattato da *Tsolakis et al. (2022)* in riferimento all'introduzione nei terminal container di AGV intelligenti per l'ottimizzazione dei movimenti tra banchina e piazzale. Nonostante sia vero che l'automazione possa ridurre la necessità di manodopera eliminando il ruolo del conducente di veicoli e operatori gru, l'effettivo dibattito riguarda quella che viene definita la trasformazione dei posti di lavoro. L'occupazione che viene eliminata nell'operatività manuale si sposta in nuovi ruoli che richiedono la presenza di personale qualificato per la gestione e manutenzione delle nuove tecnologie. Il problema ampiamente dibattuto in letteratura che scaturisce da ciò è dato dal fatto che lavori inizialmente relativamente accessibili, si trasformano in mansioni caratterizzate da forte necessità di competenze knowledge intensive e richiedendo così lavoratori più specializzati e formati, ovvero profili che escludono la classe operaia su cui si basa tuttora il funzionamento del porto. Anche quando l'intelligenza artificiale non sostituisce direttamente il lavoro umano ci si scontra con ulteriore resistenza di tipo psicologico e culturale. Le tecnologie avanzate generano nelle persone il timore di non riuscire ad adattare il proprio lavoro alla novità tecnologica, un timore sostenuto in aggiunta da possibile sfiducia di base verso innovazioni dirompenti. *Le A. V. et al. (2021)* tiene in considerazione questo fenomeno nella presentazione della propria intelligenza artificiale robotizzata "Hornbill" progettata per la pulizia e manutenzione di scafi e cisterne. Similarmente al caso dell'affidamento all'IA delle operazioni di sicurezza, anche

in questo caso è da considerare il rischio che gli operatori, soprattutto in riferimento agli armatori, esercitino resistenza nel delegare il compito di manutenzione a macchine autonome. La motivazione sottostante a tale resistenza sarebbe di natura puramente culturale e psicologica basata sulla convinzione irrazionale che operazioni particolarmente sensibili rispetto alla sicurezza tecnica dei mezzi debbano essere svolte esclusivamente da esseri umani, i quali nella realtà dei fatti commettono frequentemente errori, un difetto che i sistemi informatici non presentano.

Foster et al. (2020) evidenziano infine che, per quanto le persone possano essere più o meno propense ad accettare l'innovazione, l'adozione di tecnologie avanzate richiede un buon grado di maturità organizzativa e preparazione culturale all'interno dell'azienda. Si intende con ciò la disponibilità a modificare i processi esistenti e la capacità di gestire la transizione verso un ambiente di lavoro più tecnologico. Gli autori sottintendono così quel rapporto di sinergia che si deve creare tra innovazione e organizzazioni per accompagnare sul mercato una tecnologia come l'IA, in grado di apportare benefici non solo in capo al singolo operatore ma anche alla totalità del sistema portuale.

IV.5.2. Investimenti ingenti

Un aspetto generalmente sottovalutato in letteratura riguarda il costo di implementazione di un nuovo sistema di intelligenza artificiale nella propria organizzazione, il quale non si limita al solo acquisto della tecnologia. L'investimento in IA è infatti composto da una serie di voci da valutare attentamente in ottica di sostenibilità nel tempo vista l'influenza che queste hanno in bilancio. La prima di tali voci consiste nel costo di acquisto del software e, a seconda dei casi, dell'hardware necessario per accogliere l'intelligenza artificiale. Quanto più è complesso il modello IA utilizzato, tanto maggiori saranno i dati elaborati e tanto maggiore sarà la necessità di investire in server aggiuntivi o in processori con capacità elevata. Non è da trascurare inoltre il costo di acquisto delle licenze, poiché una moltitudine di IA, ovvero quelle offerte da piattaforme commerciali esterne, richiedono il possesso di licenze da rinnovare periodicamente; si tratta però di tariffe che variano a seconda del grado di utilizzo del sistema. Come dimostrato precedentemente, perché l'adozione di una nuova tecnologia avanzata come l'IA abbia successo all'interno

dell'organizzazione, è essenziale formare adeguatamente il personale sui diversi livelli gerarchici, generando così ulteriori costi. Non è da pensare, soprattutto per una tecnologia in costante evoluzione come l'IA, che la formazione del personale consista in un evento isolato, richiede infatti aggiornamento continuo in modo da evitare che le competenze sviluppate dai dipendenti e manager diventino obsolete rispetto allo stato della tecnologia. La formazione rappresenta dunque un costo periodico e particolarmente elevato nei casi di imprese di grandi dimensioni e fortemente strutturate. Può essere che il sistema adottato sia eccessivamente complesso anche per il personale formato, comportando così la necessità di assumere lavoratori specializzati e propriamente qualificati come data scientists, ingegneri di machine learning, esperti di Big Data e tecnici IT, le cui competenze hanno un diretto riflesso su salari e stipendi. Ulteriori costi periodici sono infine dati dalla spese di manutenzione e aggiornamento dei programmi IA nel corso della loro vita utile necessari per mantenere un buon livello di competitività rispetto alle tecnologie concorrenti.

Zaman et al. (2014) sottolineano un problema di fondo in riferimento ai sistemi di intelligenza artificiale più elaborati il cui investimento è particolarmente alto. L'implementazione di intelligenze artificiali in ambito marittimo portuale, quando particolarmente complesse, rappresenta un importante ostacolo per le PMI del settore. Gli autori si riferiscono ai modelli intesi, per esempio, per l'elaborazione di grosse mole di dati come informazioni derivanti dagli AIS o dalle società di classificazione, i quali richiedono infrastrutture tecnologiche avanzate, competenze specializzate e grande disponibilità di risorse finanziarie. Simili investimenti si scontrano con la natura dei business portuali che, ad eccezione degli operatori di grandi dimensioni, presentano storicamente bassi gradi di marginalità e conseguenti flussi di cassa insufficienti per sostenere le spese di implementazione o, alternativamente, per ottenere in primo luogo il credito necessario. Le PMI sono inoltre maggiormente esposte al rischio di fallimento tecnologico. Un investimento valutato superficialmente, infatti, può avere forti conseguenze a bilancio a causa delle insufficienti risorse per far fronte agli ammortamenti o riprogettazione dei processi aziendali. Un simile rischio porta le imprese più piccole ad essere generalmente esitanti di fronte all'adozione di nuove tecnologie che solo le imprese più grandi possono permettersi di adottare; questo fenomeno porta quindi all'aumento del

divario tra grandi e piccole imprese e ad un'inevitabile ulteriore concentrazione del mercato.

Lokuge et al. (2007) sottolineano come l'investimento in intelligenza artificiale, comportando una serie di costi che si manifestano continuamente nel corso della vita dell'immobilizzazione ed esercitando forte pressione sulla gestione finanziaria dell'impresa, debba essere risultato di un'accurata pianificazione finanziaria e strategica, includendo dove possibile previsioni realistiche sugli aggiornamenti necessari e sul consumo di risorse volto alla manutenzione e formazione del personale. I decisori devono valutare attentamente il reperimento delle risorse in fase di budget e identificare indici opportuni al supporto della decisione come, per esempio, il ritorno sull'investimento (ROI). Solo tramite un simile approccio l'impresa può minimizzare i rischi legati ai costi da sostenere, verificando che l'investimento in intelligenza artificiale apporti effettivamente un contributo positivo al successo e competitività dell'impresa.

Oltre ai costi di acquisto, aggiornamento e formazione, non sono da trascurare i costi indiretti che l'impresa deve sostenere per integrare la nuova tecnologia ai sistemi informatici e ai processi aziendali esistenti. *Pratap et al. (2017)* si riferiscono, nella spiegazione di tale ostacolo, alle imprese abituate a sistemi operativi consolidati da tempo, che si trovano ad affrontare problemi di incompatibilità tra i sistemi utilizzati e l'innovativa tecnologia dell'intelligenza artificiale. L'incompatibilità si concretizza nella capacità di elaborazione dei sistemi, nella differenza di interfacce, nel diverso formato di dati ecc. L'integrazione è possibile, ma rappresenta una sfida in termini oltre che di riprogettazione, anche di risorse finanziarie in vista dei costi che un simile intervento genera e infine di competenze. È di fatti altamente probabile che per svolgere tale operazione di ristrutturazione sia richiesto il coinvolgimento di esperti in integrazione software e IT aumentando dando così origine ad ulteriori costi. È per questo motivo che in sede di valutazione dell'investimento è essenziale per il successo di integrazione dei sistemi IA pianificare un'efficace gestione della transizione ed i relativi costi.

Le A. V. et al. (2021) affrontano l'ostacolo dei costi in riferimento ai modelli portuali landlord¹⁹, nello specifico in fase di gara per l'ottenimento delle concessioni. Nel contesto

¹⁹ Modello Landlord: "In questo modello l'Autorità Portuale è un soggetto regolatore e pianificatore dello sviluppo del porto. Le aree portuali, affidate in concessione ai privati per un lungo periodo di anni, sono gestite, in piena responsabilità ed autonomia, da essi. Le sovrastrutture, in particolare le unità di movimentazione di banchina e di piazzale (ma anche i magazzini e gli uffici), sono frutto di grandi

attuale, in cui l'intelligenza artificiale in ambito portuale risulta ancora un tema poco discusso, riuscire a giustificare in sede di gara l'economicità di un investimento in sistemi IA è complesso. I business plan da presentare, infatti, devono poter supportare contratti a lungo termine ed essendo caratterizzati soprattutto nei primi anni da bassissimi margini di utile (è fisiologico aspettarsi di operare in perdita per i primi anni di attività) ogni spesa deve essere attentamente ponderata per garantire la sostenibilità finanziaria del progetto. L'investimento in IA, come dimostrato dai possibili benefici che una simile tecnologia può apportare al porto, ha forti potenzialità, ma ha altrettanto forte rilevanza finanziaria, e gli eventuali risultati tangibili e misurabili nel breve-medio termine difficilmente possono essere provati alle autorità concedenti. La difficoltà nel convincere gli stakeholder dell'economicità dell'investimento trova luogo anche in fase di reperimento dei finanziamenti necessari a far fronte agli ingenti costi di implementazione. *Cremen et al. (2022)* evidenziano infatti come la poca disponibilità di casi di successo di investimenti in intelligenza artificiale in ambito portuale porti le istituzioni finanziarie ad assumere un approccio generalmente riluttante nel concedere credito per progetti di questo tipo, rendendo ancora più difficile l'inclusione di modelli intelligenti a supporto della gestione organizzativa nei bilanci del business plan.

IV.5.3. Cybersecurity

Considerando l'esposizione a questioni di sicurezza informatica che comporta l'utilizzo di grandi quantità di dati, ci si aspetta ragionevolmente che gli sviluppatori di intelligenze artificiali includano negli studi misure di sicurezza volte alla protezione della cybersecurity. Tuttavia, in letteratura la sicurezza informatica, soprattutto in un ambito sensibile come quello marittimo portuale, viene trattata in maniera limitata. Le IA progettate per l'utilizzo nel contesto portuale elaborano appunto dati provenienti da una moltitudine di fonte, molte delle quali contengono informazioni particolarmente sensibili interessando una buona parte degli operatori che si interfacciano con il sistema porto. Tali informazioni riguardano dettagli su spostamenti delle navi, merci, piani di carico,

investimenti privati. I terminalisti privati sono spesso grandi società internazionali con terminali in tutti i porti mondiali.” – Marino Lupi; Sistemi di Movimentazione e Stoccaggio – Università di Pisa

movimentazione dei container, polizze di carico ecc. rendendo i porti obiettivi attraenti per attacchi informatici. Una fuga di dati, il sabotaggio delle operazioni ed il conseguente blocco dell'operatività rischiano di avere conseguenze catastrofiche per il sistema porto interrompendo il flusso della catena di approvvigionamento e causando ingenti perdite economiche con riflessi su tutti i traffici precedenti successivi al nodo portuale. *Lokuge et al. (2017)* affermano quindi che la sicurezza informatica deve essere un elemento di assoluta priorità nella progettazione ed implementazione di sistemi IA in ambito portuale includendo sistemi di prevenzione e di protezione per arginare le possibili conseguenze di un cyber attacco. Nel concreto simili misure si identificano nell'adozione, per esempio, di soluzioni quali la crittografia dei dati, l'autenticazione a più fattori per accedere ai sistemi come già implementata in sistemi operativi di utilizzo quotidiano e firewall aggiornati. La componente tecnica della sicurezza informatica è dunque fondamentale, ma solo efficace se accoppiata alla formazione del personale su pratiche sicure nell'uso delle tecnologie digitali volta a prevenire la possibilità che la vulnerabilità informatica derivi da errori umani.

Min H. et al. (2022) riconoscono, tuttavia, che garantire un alto grado di sicurezza informatica in ambito portuale sia una vera propria sfida a causa della diffusa digitalizzazione ed interconnessione dei sistemi portuali, che hanno portato le tecnologie interessate ad operare sinergicamente per gestire al meglio il flusso di navi e merci (piattaforme di monitoraggio logistico, sistemi di gestione del traffico, device di IoT ecc.). L'interconnessione che lega questa rete ha un ruolo ambivalente: da un lato la sinergia che ne deriva efficientia ed automatizza un grande numero di processi, dall'altro offre ad eventuali hacker più possibili alternative di attacco. Per questo motivo cercare di sviluppare misure volte alla protezione integrale della rete digitale portuale, contestualmente alla continua evoluzione nella complessità di minacce, rappresenta un importante ostacolo all'adozione di ulteriori tecnologie avanzate come l'IA. Inoltre, al di fuori della complessità tecnica, i costi associati all'aumento della cybersecurity portuale possono essere significativi. Le infrastrutture di sicurezza informatica devono essere progettate per coprire un'ampia gamma di scenari e di minacce e mantenere un livello adeguato di sicurezza implica l'impiego di personale altamente specializzato, il cui addestramento e la cui gestione vanno a pesare ulteriormente in bilancio. Le organizzazioni portuali devono quindi bilanciare l'esigenza di protezione con i costi

operativi, il che può essere particolarmente impegnativo, soprattutto per le strutture portuali giovani o con marginalità moderata. È quindi evidente che il tentativo di garantire una protezione ottimale in un ambiente così complesso e interconnesso porta inevitabilmente ad importanti sfide economiche e operative.

Foster et al. (2020) considerano infine il tema della sicurezza informatica non propriamente in senso tecnologico quanto più giuridico. I dati gestiti dal singole operatore utenti di intelligenza artificiale, infatti, non riguardano l'interesse del solo operatore, bensì contengono informazioni sensibili di clienti, collaboratori, fornitori ed eventuali autorità. L'esposizione del modello di IA adottato, il quale attinge le informazioni da elaborare da banche dati condivise, rischia di fungere da portale per possibili attacchi informatici che andrebbero ad inficiare anche i restanti soggetti connessi. Nasce così la questione sulle conseguenze legali e sulle potenziali cause per negligenza nella protezione dei dati. Foster sottolinea come un'insoddisfacente protezione dei dati possa tradursi in responsabilità per danni subiti da terze parti, comportando sanzioni determinate dalle normative nazionali e internazionali sulla protezione dei dati, quali, per esempio, la normativa del GDPR²⁰ diffusa a livello comunitario. È possibile, inoltre, che i contratti commerciali con clienti e partner possano includere clausole di sicurezza, rendendo gli operatori portuali responsabili per qualsiasi danno derivante da attacchi informatici a seconda di quanto stabilito in fase di contrattazione.

IV.5.4. La normativa

L'introduzione nel settore marittimo portuale di una tecnologia innovativa ed impattante come l'intelligenza artificiale richiede un'adeguata copertura normativa, in grado di monitorare e standardizzare il processo di adozione e l'utilizzo della stessa in un ambiente interconnesso e di portata internazionale. In considerazione dei legami internazionale che caratterizzano l'operatività dei porti, è essenziale che una giusta normativa venga

²⁰ GDPR regolamento n. 2016/679 - Il Regolamento generale sulla protezione dei dati (GDPR, dall'inglese General Data Protection Regulation) è un regolamento dell'Unione Europea che disciplina il modo in cui le aziende e le altre organizzazioni trattano i dati personali. Il GDPR ha influenzato significativamente altre normative sulla privacy dei dati in tutto il mondo e richiede la conformità di qualsiasi organizzazione che acceda ai dati personali delle persone nell'UE.

(da: Usercentrics Cookiebot)

sviluppata in accordo tra paesi per evitare discrepanze tra giurisdizioni. Ineguaglianze normative su scala globale rischiano di generare barriere commerciali, squilibri nei traffici, inefficienze e bassa trasparenza in questioni di responsabilità giuridica. La regolamentazione dell'IA nei porti deve superare dunque i confini dei singoli contesti nazionali, poiché la natura del trasporto marittimo implica la necessità di standard comuni che tutti i paesi interessati possano accogliere. Questo richiede confronto tra governi e organismi di regolamentazione come l'Organizzazione Marittima Internazionale (IMO), per sviluppare opportune linee guida e normative in modo da garantire la sicurezza, l'efficienza e l'equità nell'adozione della tecnologia. Per quanto sia immediato arrivare alla conclusione di una simile necessità, riuscire a sviluppare effettive normative internazionali in tema di intelligenza artificiale portuale risulta, nel concreto, piuttosto complesso a causa di alcuni ostacoli. In primo luogo, in fase di negoziazione di standard internazionali, è da considerare che ogni nazione approccia temi quali la gestione della sicurezza, l'efficienza operativa e la protezione dei dati in maniera distinta e riuscire a trovare adeguati compromessi tra nazioni implica un giusto equilibrio tra protezione nazionale e cooperazione internazionale. Negoziare le condizioni della normativa potrebbe richiedere quindi anni di contrattazioni tra governi, altri organismi e attori privati; tempi durante i quali le tecnologie stesse rischiano di evolversi rallentando ulteriormente il processo. Un secondo fattore che si pone in ostacolo alla formulazione di normativa internazionale ha a che fare con lo stato attuale della tecnologia dell'intelligenza artificiale portuale. Si tratta infatti di un'innovazione la cui diffusione è ancora molto limitata fra porti a livello globale, per cui la mancanza di dati storici e di IA specifiche diffuse con successo rende complicata l'individuazione di uno standard su cui basare i contenuti dell'eventuale normativa. Non è però concepibile la diffusione di una simile tecnologia in assenza di standard internazionali, poiché si rischierebbe la proliferazione di approcci non coordinati, creando disparità nell'adozione ed utilizzo tra i diversi porti del mondo, portando così ad una frammentazione del settore portuale a livello internazionale. *Zaman et al. (2014)*, nell'articolo "*Fuzzy FMEA model for risk evaluation of ship collisions in the Malacca Strait: Based on AIS data*", pongono particolare enfasi sulla necessità di formulazione di adeguate misure giuridiche internazionali, poiché non solo trattano il tema dell'IA applicata alla sicurezza marittima, argomento particolarmente sensibile alle norme imposte dagli organi nazionali ed

internazionali, ma anche perché il caso di studio presentato analizza i risultati dell'utilizzo di IA per la prevenzione di collisioni tra navi nello Stretto di Malacca, il quale rientra nella giurisdizione territoriale di tre paesi costieri, ovvero Malesia, Indonesia e in parte Singapore. L'applicazione di intelligenza artificiale nel solo caso dello stretto richiederebbe dunque la negoziazione di standard normativi e l'approvazione unanime di tre nazioni differenti.

Oltre alla necessità di sviluppare nuove normative dedicate all'applicazione dell'IA in ambito portuale diventa fondamentale assicurarsi, previa l'adozione di un sistema di intelligenza artificiale, che vi sia compatibilità con la normativa vigente. L'attuale quadro normativo marittimo portuale è il risultato di più di un secolo di sviluppo legislativo e accordi internazionali ottenendo il primo impulso dal disastro del Titanic nel 1912, il quale ha portato diverse nazioni a stilare in comune accordo la convenzione internazionale marittima SOLAS²¹ (prima versione 1914). Oggi il trasporto marittimo conta su convenzioni internazionali, codici internazionali, leggi nazionali e norme comunitarie, nessuna delle quali, tuttavia, è stata concepita in considerazione delle capacità ed implicazioni di tecnologie avanzate come l'intelligenza artificiale (*Chen C. H. et al. 2014*). Ciò dà origine ad una situazione complessa in cui l'integrazione di IA nei porti deve essere attentamente gestita per garantire la conformità con le regolamentazioni esistenti, senza inficiare sul corretto funzionamento dello stesso. Ciò comporta il rischio, per cui l'implementazione possa entrare in conflitto con le normative esistenti o che banalmente le linee guida necessarie per un utilizzo appropriato non siano sufficienti se non completamente inesistenti. Inoltre, la conformità con la normativa esistente potrebbe richiedere che l'IA venga sviluppata tenendo conto di requisiti legali che difficilmente possono essere rispettati per la natura degli algoritmi sottostanti. Questo porta alla necessità di un'interazione stretta tra sviluppatori, legali, e autorità regolatorie per garantire le tecnologie possano essere integrate nel totale rispetto delle norme preesistenti. *Pratap et al. (2017)* riconoscono che conformare un sistema intelligente, sviluppato inizialmente senza vincoli normativi dedicati, ad un nuovo quadro normativo oltre che a

²¹ SOLAS = Safety Of Life At Sea – “SOLAS è la convenzione IMO per garantire la salvaguardia della vita umana in mare, disciplina gli aspetti fondamentali della sicurezza per le navi che effettuano viaggi internazionali, come la stabilità, i macchinari, gli impianti elettrici, la protezione antincendio e i mezzi di salvataggio. L'obiettivo principale della Convenzione SOLAS è quello di specificare gli standard minimi per la costruzione, l'equipaggiamento e l'esercizio delle navi in maniera compatibile con la loro sicurezza” da rina.org

quello esistente risulta un processo complesso che richiede tempo. *Tsolakis et al. (2022)* enfatizzano la problematica temporale che circonda la questione normativa. La formulazione di nuove norme spetta a decisori politici ed altri attori istituzionali; consiste in un processo complesso e richiede spesso un periodo di tempo considerevole. Le tempistiche estese dell'iter legislativo rischiano di creare discrepanza tra il quadro normativo pensato per regolamentare l'intelligenza artificiale portuale e la rapida evoluzione della stessa. Un simile disallineamento potrebbe rallentare l'introduzione sul mercato dell'innovazione portandola a perdere il giusto tempo di entrata compromettendone il potenziale successo. Le imprese portuali, in uno scenario in cui sono già a conoscenza dell'imminente ingresso sul mercato dell'IA, potrebbero vedersi così scoraggiate dall'investire nella tecnologia, temendo l'incertezza normativa ed il rischio di implementare soluzioni potenzialmente non conformi alle future norme. Per evitare che si verifichi obsolescenza normativa è fondamentale che i decisori approccino la sfida della formulazione di norme in tema di intelligenza artificiale nei porti con senso di proattività e collaborazione con il supporto di esperti e di futuri utenti interessati in modo da ottimizzare i tempi e anticipare, nonché accompagnare, la contestuale evoluzione della tecnologia.

Infine, *Le A. V. et al. (2021)* ricordano che allo stato attuale le intelligenze artificiali, che possono svolgere ruolo in porto, proposte dagli studiosi presentano caratteristiche fondamentali molto diversificate. In uno scenario ideale, in cui il sistema porto opera in sinergia con un vasto numero di modelli IA a seconda delle operazioni che supportano, sarebbe perciò opportuno che la copertura normativa sia proporzionata al livello di estensione e complessità del singolo sistema. Intelligenze artificiali più critiche, utilizzate per esempio nell'automazione di operazioni di sicurezza marittima, necessiteranno di disposizioni più dettagliate e rigorose quali risultato dell'insieme di norme sulla sicurezza informatica, sulla gestione del rischio e sulla responsabilità legale da malfunzionamenti. Idealmente la normativa sviluppata dovrebbe essere in grado di evolversi insieme alla tecnologia, mantenendo un buon grado di flessibilità per permettere il fisiologico progresso della tecnologia senza però lasciare possibili falle nelle disposizioni.

IV.5.5. La complessità dei sistemi

Un ostacolo di base dell'intelligenza artificiale in senso generale risiede nella sua complessità, che si manifesta sia nello sviluppo sia nella comprensione dei sistemi. La progettazione di IA avanzate richiede competenze altamente specializzate in diversi settori, come l'analisi dei dati, la programmazione e la matematica, fondamentali per formulare e implementare gli algoritmi che ne determinano il funzionamento. La necessità di queste competenze può essere una sfida nella diffusione a livello commerciale di sistemi intelligenti, poiché le persone dotate della conoscenza necessaria non sono, per la maggior parte dei potenziali utilizzatori di IA a livello portuale, facilmente reperibili. Un esempio di complessità è dato dalle reti neurali artificiali, le quali richiedono la conoscenza approfondita di architetture complesse, la capacità di calibrazione di iperparametri²² e l'addestramento basato su importanti volumi di dati per garantire prestazioni ottimali. La difficoltà non risiede quindi nella sola creazione delle reti neurali, bensì anche nella comprensione del loro funzionamento e dei risultati prodotti. Queste reti, infatti, possono prendere decisioni difficilmente comprensibili in prima istanza in mancanza delle giuste conoscenze, aumentando ulteriormente la complessità nella loro gestione e applicazione in contesti sensibili come quello portuale. Per *Bulut et al. (2011)* tale complessità rappresenta un ostacolo anche nei rapporti con altri soggetti. Secondo gli autori è infatti da tenere in considerazione il fatto che affidare ciecamente ad intelligenze artificiali l'attività di supporto decisionale può portare gli operatori a seguire un processo decisionale, che loro stessi non sono in grado di giustificare. Nonostante le decisioni alternative proposte dai DSS vengano elaborate secondo criteri processati in un'ottica di ottimizzazione delle operazioni, è possibile che stakeholder quali, per esempio, i clienti non comprendano suddetti criteri di decisione andando così ad inficiare la fiducia verso l'operatore.

A presentare alti livelli di complessità non è solo il modello IA utilizzato, bensì anche i dati di input necessari al funzionamento del sistema. Ne è un esempio il modello FMEA sviluppato da *Zaman et al. (2014)* per la valutazione del rischio di collisioni nello Stretto di Malacca. Per funzionare propriamente ed elaborare soluzioni accurate, il modello

²² Iperparametri: misure utilizzate per controllare il processo di apprendimento. A seconda dei diversi modelli di dati da generalizzare, i sistemi di machine learning richiedono vincoli, pesi e tassi di apprendimento diversi.

richiede l'accesso a grandi quantità di dati provenienti da banche dati come, in questo caso, il database dell'Automatic Identification System (AIS), il cui scopo consiste nel tracciare in tempo reale posizioni e movimenti delle navi. Tuttavia, le operazioni per la raccolta, l'elaborazione e l'interpretazione dei dati richiede risorse significative, non solo in termini di capacità computazionale ma anche di competenze tecniche necessarie per analizzare opportunamente i dati. È chiaro, dunque, che la problematica della complessità colpisce il modello stesso ed il suo funzionamento, la struttura dei dati e le decisioni di supporto offerte da decifrare. Un ulteriore punto interessato dallo stesso ostacolo, che in alcuni casi raggiunge alti livelli di complessità computazionale, consiste nella generazione delle soluzioni. Nonostante i sistemi di IA siano progettati per affrontare matematicamente e autonomamente problemi strutturati, la complessità, soprattutto dei problemi combinatori come la distribuzione tra nodi di container pieni e vuoti affrontata da *Bandeira et al. (2009)* in “*A DSS for integrated distribution of empty and full Containers*”, può portare un modello di intelligenza artificiale ad impiegare tempi relativamente lunghi per la generazione di una soluzione. Non si tratta di un difetto intrinseco dell'intelligenza artificiale, poiché i problemi combinatori implicano la valutazione di un numero di possibili combinazioni di soluzioni alternative, che aumentano esponenzialmente con il crescere del numero di variabili del problema. In questo modo, il tempo necessario per la formulazione di una soluzione accettabile, in assenza di tecniche di semplificazione o approssimazione, potrebbe annullare il vantaggio della celerità di processo tipico dei sistemi di IA fino, nel peggiore degli scenari, ad impattare negativamente sull'efficienza operativa.

Nello sviluppo di intelligenze artificiali, quando l'obiettivo del modello consiste nel simulare decisioni e processi di analisi, ci si scontra con il trade off tra fedeltà al contesto reale nella formulazione delle decisioni e complessità del modello e dei relativi algoritmi. Quando l'IA rispecchia al meglio la realtà dei fatti, elaborando in maniera più approfondita grosse quantità di dati, le soluzioni offerte necessitano di minore interpretazione nonché adattamento/correzione fornendo così un migliore supporto. Al contempo, però, un maggiore livello di dettaglio si traduce in algoritmi più complessi che implicano costi di sviluppo ingenti, necessità di competenze più specializzate e tempi di elaborazione più lunghi. In alternativa il potenziale utente può affidarsi a modelli più semplici, meno costosi e più rapidi nelle elaborazioni, le cui soluzioni, tuttavia, rischiano

di essere poco significative rispetto al contesto reale. Per chiarire meglio il concetto del trade off si consideri "A fuzzy extended DELPHI method for adjustment of statistical time series prediction: An empirical study on dry bulk freight market case" di Duru et al. (2012). Il modello intelligente fuzzy-DELPHI sviluppato dagli autori viene programmato per la previsione dei traffici e dell'andamento del mercato dei noli dry bulk. La conclusione dello studio evidenzia l'applicabilità e validità del modello, riconoscendo però l'incapacità dello stesso di considerare un elemento molto rilevante per le previsioni di mercato, ovvero la stagionalità. Si tratta di una caratteristica importante con un forte impatto sull'andamento dei noli, soprattutto nel commercio di rinfuse, e ignorarla comporta nel medio lungo termine incongruenze tra la modellizzazione e la realtà. Ciò non significa che non sia possibile includere la stagionalità nella simulazione effettuata dal modello, spetta tuttavia allo sviluppatore decidere se mantenere il proprio sistema IA accessibile e meno complesso nel suo insieme o se renderlo più elaborato e preciso con riflessi su costi e tempi computazionali.

Al di fuori della complessità informatica, non è da escludere la complessità operativa che caratterizza le operazioni portuali. L'operatività portuale, quale ingranaggio di un meccanismo logistico altrettanto articolato, è il risultato della sinergia instaurata tra operatori di diversa natura (compagnie di navigazione, spedizionieri, dogane, autorità marittime ecc.) per la movimentazione di grandi volumi di merci con l'obiettivo di massima efficienza, tale da evitare congestioni, ritardi o altri blocchi. Si crea quindi un delicato equilibrio tra pianificazione di servizi ancillari, servizi di carico e scarico, dogane, flussi di merci tra magazzini e altre modalità di trasporto; equilibrio che un buon modello di intelligenza artificiale portuale deve essere in grado di simulare o quantomeno considerare nella formulazione di soluzioni. I soli terminal container rappresentano ambienti operativi complessi, i quali fanno affidamento a risorse limitate e sono influenzati da variabili aleatorie che possono cambiare in tempi molto brevi. Lokuge et al. (2014) affermano che per poter fare fronte alla dinamicità dell'ambiente sono richiesti agenti software sufficientemente adattabili e con alta reattività nei processi di calcolo. L'algoritmo della singola intelligenza artificiale, secondo De León et al. (2017), deve quindi essere progettata in ottica di massima congruenza con le caratteristiche specifiche del problema e del contesto in cui l'utente opera. La complessità del contesto marittimo portuale si riflette inoltre sulle decisioni prese dagli operatori e sulla moltitudine di criteri

di cui tenere conto durante il processo decisionale. I criteri, oltre che numerosi e di diversa natura, sono spesso in contrasto tra loro. Si pensi alla figura dell'armatore in sede di acquisto della nave: quando il mercato è in una delle fase cicliche di noli alti, l'armatore ha convenienza ad aumentare la dimensione della flotta per sfruttare i flussi di liquidità derivanti dai noli acquistando navi nuove. Allo stesso tempo se il mercato presenta noli alti anche i prezzi delle navi nuove e second hand seguiranno l'andamento crescente. Il momento giusto per acquistare la nave coincide quindi con il momento di basso del mercato, ma trattandosi di un momento di basso è altamente probabile che l'armatore non disponga della liquidità necessaria per effettuare l'investimento. La dissonanza tra criteri decisionali rappresenta sicuramente una sfida per il decisore umano, ma in base a valutazioni soggettive è comunque in grado di giungere una conclusione ponderata. Riuscire, tuttavia, a modellizzare metodi risolutivi basati su criteri discordanti o in alternativa sviluppare algoritmi in grado di effettuare valutazioni soggettive non è immediato e, come sottolineato da *Wibowo et al. (2012)*, il sistema decisionale che ne deriva rischia, se non progettato propriamente, di non operare in maniera efficace.

Una possibile soluzioni per contrastare la complessità nella generazione di soluzioni da parte dell'intelligenza artificiale consiste nella "generazione automatica di feedback e recupero automatico degli errori". L'approccio proposto da *Min H. (2022)* permette all'IA di individuare autonomamente eventuali errori nella generazione di soluzioni e di auto-correggersi, evitando l'intervento esterno. In porto la continuità delle operazioni è essenziale, per cui questa capacità di rappresenta una fonte di vantaggio competitivo. Includendo nell'IA questa abilità diventa possibile, a titolo esemplificativo, rilevare errori nell'allocazione delle banchine, perché ritenuta non efficiente a seguito di un cambiamento nelle variabili di contesto, e ricalibrare le operazioni in tempo reale, garantendo la costante ottimizzazione delle soluzioni.

IV.5.6. L'inadeguatezza delle strutture

In letteratura, in sede di sviluppo di modelli IA progettati per l'utilizzo in ambito portuale, una questione affrontata frequentemente riguarda l'integrazione dei sistemi intelligenti ai sistemi informatici ed operativi esistenti. La questione della compatibilità con le strutture

esistenti si presenta come una sfida alla diffusione dell'innovazione, poiché non è da prendere per scontato che queste siano adeguate ad accogliere simili tecnologie avanzate. L'inadeguatezza delle strutture a fronte dell'adozione di IA non si manifesta soltanto a livello fisico, ma riguarda anche la compatibilità dei dati che i modelli intelligenti devono elaborare. La maggior parte delle intelligenze artificiali sono progettate per lavorare con dati strutturati, ovvero dati organizzati in formati definiti e prevedibili, facilitandone l'elaborazione e l'analisi. Tuttavia, le operazioni portuali per loro natura producono dati spesso non strutturati²³ e complessi. L'origine dei dati può essere infatti varia, possono includere informazioni provenienti da fonti come sensori di bordo, sistemi di monitoraggio, report delle operazioni o semplici comunicazioni tra gli attori, creando così dati dinamici e variabili. Ciò non comporta un'incompatibilità di fondo che pregiudica l'adozione di intelligenza artificiale a livello portuale, rappresenta però sicuramente una delle prime sfide in fase di diffusione della tecnologia (*Besikçi et al. 2016*).

Bulut et al. (2011) precisano che anche se fosse possibile strutturare i dati previa elaborazione da parte dell'intelligenza artificiale, persiste il problema della loro accuratezza ed affidabilità. La qualità dei dati di input ha un diretto riflesso sulla bontà delle soluzioni offerte dal sistema, è però possibile che essi siano soggetti a errori umani, che siano incompleti o possibilmente provenienti da sensori e sistemi obsoleti che non garantiscono la precisione necessaria. La bassa qualità dei dati non origina solamente da malfunzionamenti o errori, può infatti derivare anche dalla frammentazione delle fonti, dall'eterogeneità dei formati delle stesse o da discrepanza temporale. In relazione a quest'ultima, emergono problemi di discrepanza temporale nei dati di input soprattutto nei casi di supporto alle previsioni come nello studio di *Duru et al. (2012)* menzionato precedentemente, in cui sono necessarie grandi quantità di dati storici per la previsione dell'andamento del mercato dei noli. Nello specifico l'IA potrebbe riscontrare difficoltà nell'elaborazione dei dati storici quando gli stessi non sono più reperibili perché eccessivamente datati (meno frequente) oppure quando nel corso del tempo muta, anche più volte, la relativa struttura.

²³ Dati strutturati: formattati secondo criteri definiti, rende l'automazione della gestione e dell'analisi più semplice ed efficiente.

Dati non strutturati: non presentano una struttura comune predefinita, richiedono maggiore sforzo computazionale per l'elaborazione e manipolazione

Allo stato attuale numerosi modelli di intelligenza artificiale progettati per l'utilizzo portuale vengono presentati in letteratura nei loro dettagli teorici essenziali, dando vita a pochi effettivi casi pratici di implementazione. Mantenere l'innovazione su un piano prettamente teorico però porta ad escludere alcuni elementi rilevanti per la reale fattibilità. Si tratta di ostacoli pratici relativi alle strutture fisiche che emergono solo con l'effettiva applicazione o che, qualora lo sviluppatore fosse in grado di prevederli, difficilmente sono teorizzabili. Un esempio della mancata considerazione di elementi pratici compare in “*A mechanism for scheduling multi robot intelligent warehouse system face with dynamic demand*” di Li Z. et al. (2020), in cui vengono progettati dei robot per la movimentazione delle merci e preparazione degli ordini all'interno di magazzini intelligenti (Fig. 4.11):

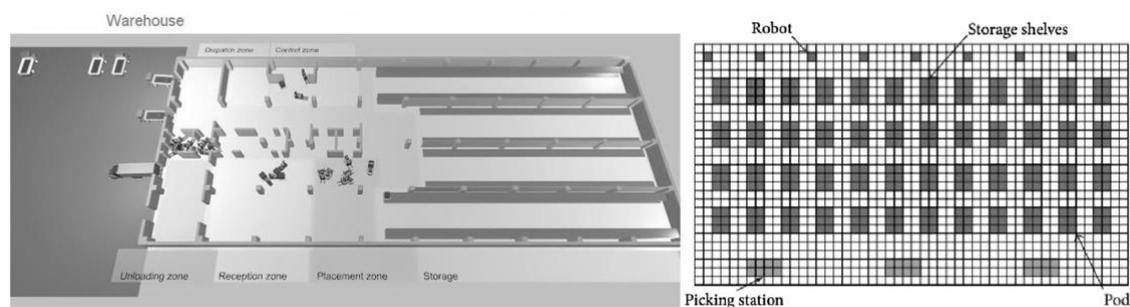


Fig. 4.11 – Render 3D del modello del magazzino base di studio

Da “*A mechanism for scheduling multi robot intelligent warehouse system face with dynamic demand*” di Li Z. et al. (2020)

Il vantaggio di includere robot nella gestione del magazzino consiste nel minore utilizzo di spazio a parità di agenti e nella rapidità di spostamento delle merci. Tale vantaggio emerge anche nel run di simulazione del sistema, ma nell'implementazione pratica di prova diventa evidente il problema delle probabili collisioni tra agenti nell'ambiente spazialmente limitato del magazzino.

Il fatto che la maggior parte dei modelli di intelligenza artificiale portuale sviluppati fino ad ora si basi su determinati porti o terminal utilizzati come caso di studio, lega il funzionamento della singola IA alle particolarità del porto. La dipendenza che si instaura nel sistema verso le condizioni operative e configurazioni strutturali del singolo porto preso in esame rischia di pregiudicare l'applicabilità universale dell'intelligenza artificiale. Differenze di dimensioni del sistema portuale, nei flussi di traffico, nelle tecnologie di movimentazione e nelle eventuali normative locali riducono drasticamente l'efficacia di un modello progettato per un solo caso specifico. *Maldonado et al. (2019)* riconoscono, nel proporre il proprio strumento IA per l'ottimizzazione delle

movimentazioni a piazzale, che semplici differenze tra terminal nella disponibilità di RTG può limitare l'applicabilità di determinate strategie di stoccaggio proposte dal DSS, per cui la generalizzazione dei risultati non è immediata. Anche nei casi in cui la compatibilità è effettivamente possibile, l'integrazione tra tool IA e sistemi informatici esistenti richiede comunque risorse aggiuntive. Ciò si concretizza, nella maggior parte dei terminal, nella creazione di interoperabilità tra strumento IA sviluppato ed il TOS²⁴ del terminal (Ursavas et al. 2014). Il processo di integrazione, tuttavia, non è semplice, poiché precede innanzitutto una fase di valutazione della compatibilità tra sistemi effettuata da esperti IT, segue una seconda fase di eventuali aggiornamenti di sistemi hardware e software volti a garantire che le nuove funzionalità basate sull'IA siano supportate. Inoltre, il processo di integrazione necessita di una pianificazione accurata e coordinata includendo la partecipazione di sviluppatori dell'IA, fornitori del TOS ed operatore portuale in questione, in modo che la transizione avvenga fluidamente con successo. Pratap et al. (2017) sottolineano come non siano da sottovalutare le effettive limitazioni fisiche infrastrutturali del porto. Nonostante l'intelligenza artificiale portuale sia pensata per efficientare ed ottimizzare i processi e le operazioni portuali, la capacità di un porto di accogliere tale efficientamento è vincolata dalle strutture esistenti. Soluzioni tecnologiche come tool intelligenti proposti dalla letteratura non possono superare, senza significativi cambiamenti infrastrutturali, elementi contingenti quali: la lunghezza delle banchine, la capacità delle gru e di altri impianti di movimentazione, il numero di ormeggi disponibili ecc. A titolo esemplificativo, un sistema IA volto all'ottimizzazione del flusso di navi in ingresso e in uscita non concretizzerà i suoi effetti se il terminal non dispone di banchine con capacità sufficiente per accogliere un maggior numero di navi a parità di orizzonte temporale. L'operatore portuale deve decidere in ottica di ciò se investire nell'ampliamento della capacità per beneficiare degli effetti dell'innovazione tenendo, dovendo però sostenere ulteriori costi in aggiunta ai costi fisiologici di implementazione.

Un esempio di come la struttura portuale esistente possa essere inadeguata per l'introduzione di un sistema intelligente è dato da "*Design and development of an intelligent context-aware decision support system for real-time monitoring of container*

²⁴ TOS: Terminal Operating System – supporta il controllo del movimento e dello stoccaggio delle merci all'interno del terminal permettendo un efficiente utilizzo di risorse, manodopera e attrezzature.

terminal operations” di *Ngai et al. 2011*. Nel caso di studio osservato il sistema utilizza la tecnologia di reti di sensori ubiqui (USN) basate sui dispositivi di rilevamento ZigBee per tracciare in tempo reale i camion, le gru e le RTG all'interno del terminal con l'obiettivo di ottimizzare le movimentazioni delle merci a piazzale. Nell'applicazione pratica in un terminal container di Hong Kong gli autori si scontrano con un problema che pregiudica l'effettiva fattibilità del progetto, ovvero vengono a conoscenza di un errore per cui grossi oggetti metallici in movimento come i container interferiscono con la ricezione dei segnali andando ad inficiare sulla precisione dei dati raccolti. È quindi essenziale, in fase di sviluppo dell'IA e previa l'adozione, effettuare valutazioni dell'effettiva applicabilità ai diversi contesti infrastrutturali potenzialmente interessati dalla tecnologia.

IV.5.7. L'incertezza

Un aspetto che la letteratura evidenzia con particolare enfasi è che l'introduzione dell'intelligenza artificiale in un contesto dinamico e mutevole come quello portuale non elimina l'incertezza intrinseca del settore, ma piuttosto la misura e ne supporta la gestione. Il settore portuale è notoriamente influenzato da numerose variabili imprevedibili e, nonostante l'IA non sia in grado di estinguere le fonti dell'incertezza, grazie ai sistemi di supporto adeguati diventa possibile gestire in maniera proattiva l'operatività basandosi su decisioni più informate e ponderate. Come sottolineato da *Bandeira et al. (2009)* nella ripartizione ottimale di container pieni e vuoti da tenere nel terminal, permane il fatto che la domanda, anche se gestita con il supporto di sistemi intelligenti, sia volatile ed incerta nelle sue previsioni. È ormai chiaro che una possibile fonte di valore aggiunto offerta dall'IA in ambito portuale sia la sua capacità di proporsi come strumento di previsione per traffici e tariffe marittime come proposto da *Duru et al. (2012)*. L'IA può infatti prevedere volumi di traffico e stimare le fluttuazioni delle tariffe, offrendo a operatori portuali e armatori un supporto significativo nelle loro decisioni. Tuttavia, proprio a causa dell'incertezza che circonda il mercato marittimo, quale risultato della combinazione di una moltitudine di variabili esogene come condizioni economiche globali, geopolitica e dinamiche della domanda, l'accuratezza delle soluzioni fornite dall'IA non può essere

presa come garantita. L'IA, pur dimostrandosi uno strumento efficace, deve essere considerata come supporto decisionale e non soluzione definitiva, poiché l'incertezza rimane, allo stato attuale della tecnologia, un elemento ineliminabile.

La capacità di creazione di scenari risolutivi alternativi rappresenta una possibile strategia per affrontare l'ostacolo dell'incertezza nel contesto portuale. Quando il DSS si basa su ragionamenti di tipo "what if", diventa possibile simulare contemporaneamente o quasi una vasta gamma di scenari, anticipando diversi possibili sviluppi operativi. Un simile approccio permette ai decisori di essere preparati rispetto alla variabilità del contesto riuscendo ad offrire risposte valide a fronte di cambiamenti operativi inattesi. *De León et al. (2017)* affermano, per esempio, che DSS utilizzati per il supporto del berth allocation problem si fondano spesso sulla creazione di istanze alternative analizzando diverse configurazioni di assegnazione delle banchine per carico, ETA, dimensioni della nave, pescaggio ecc. Se da un lato il ragionamento "what if" supporta il contenimento degli effetti dell'incertezza del settore, dall'altro pone il problema della complessità computazionale. Creare in tempi brevi scenari alternativi comporta di fatto l'analisi di un altissimo numero di combinazioni di variabili, che, come menzionato nel capitolo dedicato alla complessità, significa portare il sistema ad un grande sforzo computazionale e a tempi di calcolo estesi. Tramite l'utilizzo di DSS di questo tipo si riduce l'instabilità decisionale causata dall'incertezza, ma aumentano la complessità degli algoritmi necessari, i tempi di calcolo ed i costi derivanti da investimento e competenze richieste.

Ursavas et al. (2007) danno un maggiore peso alla problematica fondamentale della volatilità del contesto marittimo portuale rispetto alla natura dell'intelligenza artificiale. Gli autori affermano che un difetto fondamentale presentato dai modelli intelligenti proposti finora in letteratura consiste nella loro essenza deterministica. I modelli di IA, essendo nella maggior parte dei casi modelli deterministici, sono pensati per elaborare dati certi per giungere univocamente a soluzioni finali, per cui, da un punto di vista teorico, si trovano in diretto contrasto con la variabilità ed incertezza delle operazioni portuali. Gli autori sottolineano così come una simile incongruenza tra caratteristiche fondamentali dello strumento e dell'ambiente rappresenti un ostacolo non trascurabile.

Prendendo dunque per certo, che l'incertezza generale del contesto e dei dati derivanti dallo stesso incida direttamente sull'accuratezza dei risultati offerti dall'IA, diventa chiaro che gli effetti di questo ostacolo avranno un impatto più o meno rilevante a seconda

dei casi di applicazione. Si prenda come esempio “*Developing a risk-informed decision-support system for earthquake early warning at a critical seaport*” di *Cremon et al. (2022)*. Lo scopo dell’IA progettata nello studio e applicata al porto di transshipment di Gioia Tauro consiste nell’offrire al porto un sistema di allarme precoce da terremoto (EEW – earthquake early warning) in modo da minimizzare i danni alle persone e contenere, nonché misurare, i danni materiali. È immediato pensare che l’imprecisione delle soluzioni, quindi dell’attivazione dell’allarme, in un caso come quello riportato può avere conseguenze anche disastrose: un falso allarme rischierebbe di portare all’attivazione delle misure di protezione e ad un utilizzo vano di risorse, mentre un allarme tardivo o mancato porterebbe a conseguenze catastrofiche per persone, immobilizzazioni ed attrezzature. *Mar-Ortiz et al. (2020)* concordano che basare il funzionamento di un’intelligenza artificiale su dati incompleti, incerti, imprecisi o dati pregiudica la bontà delle soluzioni e delle decisioni prese sulla base di esse. In ambito portuale decisioni inefficaci possono causare potenzialmente congestioni o sottoutilizzo delle risorse, vanificando completamente gli effetti benefici promessi dall’innovazione. Secondo *Lokuge et al. (2018)* oltre alla fisiologica incertezza del settore e dei relativi dati, gli strumenti di IA si trovano ostacolati da un’ulteriore fonte di incertezza, quale il comportamento umano. In ambito marittimo molte operazioni risentono direttamente di possibili errori umani anche se non propriamente frequenti, per cui l’IA deve essere progettata per essere in grado di considerare nelle proprie formulazioni la possibilità della deviazione del comportamento umano. Ciò rappresenta chiaramente un ostacolo aggiuntivo. Dove, per esempio, il possibile ritardo di un ETA può essere previsto perché diretta conseguenza di un blocco nella fase di carico/scarico, di congestione o di guasti, il comportamento umano comporta una maggiore sfida di previsione perché difficilmente misurabile ed esprimibile matematicamente.

V. Indagine empirica: opinioni e aspettative dei terminalisti italiani sull'IA

Per l'indagine empirica si utilizza un approccio metodologico che integra due strumenti complementari: il questionario e l'intervista. Il questionario è funzionale alla raccolta di dati quantitativi e standardizzati, fornendo una visione generale delle percezioni e delle posizioni degli operatori portuali in merito all'adozione dell'intelligenza artificiale. Al contempo, l'intervista permette un'analisi qualitativa più approfondita, dando spazio a esperti del settore e consentendo di esaminare in modo più dettagliato le motivazioni, le sfide e le opportunità associate all'innovazione tecnologica nei terminal. Questa combinazione garantisce una comprensione ampia e dettagliata del fenomeno in esame.

Rispetto alla totalità degli operatori, l'analisi si focalizza sui terminal portuali, poiché, come indicato dalla letteratura scientifica, rappresentano l'area in cui l'applicazione dell'intelligenza artificiale è stata maggiormente esplorata (*Fig. 5.1*). I terminal sono il fulcro operativo dei porti, dove si svolgono attività complesse e ad alta intensità tecnologica, rendendoli un contesto ideale per l'adozione e l'analisi di soluzioni innovative. Questa scelta si rivela dunque necessaria per allineare lo studio con le principali ricerche accademiche.

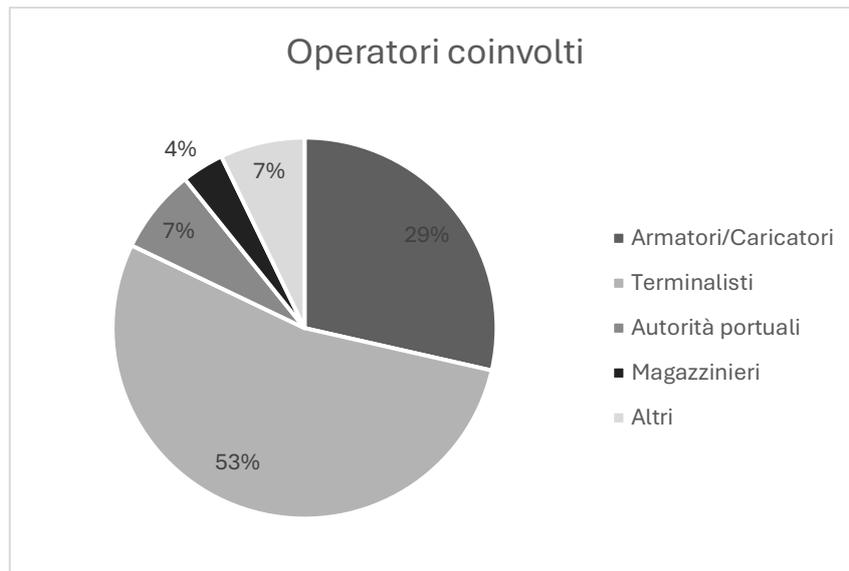


Fig. 5.1 - Percentuale di studi sull'IA in riferimento agli operatori portuali

V.1. Il questionario

Dopo lo studio delle potenzialità e dei limiti dell'intelligenza artificiale applicata al contesto portuale, è opportuno riportare le testimonianze degli operatori reali in riferimento ai contenuti riportati finora. Le testimonianze vengono raccolte tramite un questionario (realizzato sulla piattaforma web conjointly.com), il cui target sono i principali terminalisti del contesto marittimo portuale italiano.

Il questionario viene realizzato sulla base delle informazioni ricavate dallo studio della letteratura. Tramite un primo approccio inclusivo viene stilata una serie di domande volte ad inquadrare l'essenza di ciascun possibile beneficio ed ostacolo. La serie di domande viene successivamente condensata per rendere il questionario più comprensibile e la compilazione più scorrevole. I risultati del questionario sono inoltre accompagnati dall'intervista volta a catturare più esaurientemente le posizioni dei terminalisti in relazione al tema, ponendo domande maggiormente aperte sulla base di una logica più discorsiva.

Raggiungere singolarmente i terminalisti marittimi italiani per invitarli alla compilazione del questionario presenta alcune difficoltà logistiche, in quanto la probabilità di ottenere risposte dirette in tali circostanze è generalmente piuttosto bassa. Per superare questa criticità e massimizzare l'efficacia della somministrazione, è stato adottato un approccio alternativo che ha previsto la collaborazione con un soggetto rappresentativo del settore. In particolare, il questionario è stato distribuito con il supporto di Assiterminal, un'associazione di categoria che rappresenta (INSERIRE NUMERO) terminalisti italiani. Assiterminal ha svolto un ruolo chiave nella diffusione del questionario, inviandolo tramite e-mail a tutti i suoi associati e promuovendolo attraverso i propri canali istituzionali. Questo approccio ha permesso di garantire una diffusione più ampia e mirata, aumentando le possibilità di ottenere un campione rappresentativo per l'analisi. Il soggetto in questione si identifica idealmente con "Assiterminal", l'Associazione Italiana Terminalisti Portuali. Quest'ultima rappresenta 88 terminalisti presenti in 32 porti italiani, *"è la principale espressione associativa dell'industria della portualità in Italia. L'obiettivo dell'associazione è quello di promuovere lo sviluppo delle aziende dei Terminal and Port Operators con l'ausilio di una politica che valorizzi il sistema*

logistico nazionale all'interno di un contesto altamente globalizzato e dinamico agevolando i flussi di trasporto di merci e persone. La mission di Assiterminal è valorizzare la sostenibilità delle aziende integrate nell'ecosistema della logistica che rappresenta per il sistema paese Italia uno dei principali propulsori dell'economia e del lavoro” (assiterminal.it).

L'insieme dei manager addetti all'operatività del terminal rappresenta così il pool di potenziali rispondenti, ai quali viene chiesto di esprimere la propria posizione in merito alla possibilità di introduzione dell'IA in porto tramite le domande contenute nel questionario. Poiché il tema è generalmente ancora poco trattato, ci si aspetta che tra i contenuti della letteratura e l'effettiva pratica degli operatori interessati vi sia un gap. Per questo motivo il questionario segue una struttura congruente con le modalità con cui sono stati presentati i contenuti della letteratura scientifica. Rispetto ad ogni beneficio e ad ogni limitazione, viene chiesto al rispondente di esprimere il proprio grado di accordo o disaccordo con l'affermazione contenuta nella singola domanda tramite una scala Likert che riporta valori da 1 a 7 (dove 1 indica “in completo disaccordo” e 7 indica “in pieno accordo”). Il questionario si conclude infine con una domanda aperta volta ad inquadrare l'importanza che i terminalisti associano all'innovazione tecnologica, chiedendo al rispondente quali innovazioni tecnologiche sono state adottate nel terminal più recentemente e quali altre sono pianificate nel breve-medio termine.

V.1.1. Risultati del questionario

Il questionario è stato compilato da un totale di 18 terminal, un campione che, pur essendo moderato in termini quantitativi, risulta comunque adeguato agli obiettivi della ricerca. Questo risultato è particolarmente rilevante considerando le difficoltà legate al coinvolgimento dei terminalisti marittimi italiani, spesso impegnati in attività operative complesse che possono limitare il tempo a disposizione per partecipare a indagini di questo tipo. La partecipazione ottenuta rappresenta quindi un contributo prezioso per l'analisi.

Nel presente capitolo vengono analizzati e commentati i risultati ottenuti, osservando nello specifico la distribuzione del grado di accordo rispetto alle affermazioni fornite in relazione ai benefici e limitazioni dell'implementazione dell'intelligenza artificiale in ambito portuale.

I terminal rispondenti appartengono a categorie di trasporto marittimo differenti, includendo:

⇒	Merci containerizzate	- 38,9%
⇒	Rinfuse liquide	- 5,6%
⇒	General cargo	- 33,3%
⇒	Passeggeri	- 22,2%

	1	2	3	4	5	6	7
L'integrazione dell'IA nei sistemi di gestione del piazzale consente di ottimizzare i movimenti della merce, comportando una riduzione diretta dei costi operativi.	0,0%	5,6%	11,1%	0,0%	27,8%	38,9%	16,7%
L'impiego dell'IA per l'assegnazione delle banchine e delle gru ottimizza i tempi di lavorazione della nave e riduce i costi operativi.	5,6%	11,1%	16,7%	11,1%	33,3%	16,7%	5,6%
La gestione delle risorse umane e delle attrezzature attraverso l'IA migliora la competitività del terminal.	0,0%	5,6%	16,7%	27,8%	22,2%	11,1%	16,7%
L'uso di sistemi di supporto decisionale intelligenti per gestire il flusso di merci migliora la gestione della supply chain del terminal.	5,6%	5,6%	5,6%	16,7%	22,2%	22,2%	22,2%
La condivisione delle informazioni tra terminal portuali e fornitori di servizi di trasporto tramite sistemi dotati di IA consente di sviluppare piani di trasporto più resilienti ed efficaci.	5,6%	0,0%	11,1%	22,2%	16,7%	16,7%	27,8%
L'uso dell'IA per bilanciare l'offerta (assegnazione delle attrezzature) e la domanda (arrivi dei mezzi per ritiro della merce) riduce i tempi di attesa, aumentando così la produttività delle attrezzature del terminal.	5,6%	0,0%	22,2%	11,1%	27,8%	16,7%	16,7%
La formulazione di scenari operativi realistici tramite sistemi IA consente di migliorare la pianificazione operativa del terminal.	0,0%	11,1%	11,1%	22,2%	11,1%	22,2%	22,2%
L'uso dell'IA, tramite sensori installati su attrezzature e mezzi del terminal, consente di ottimizzare la programmazione della manutenzione.	0,0%	5,6%	0,0%	22,2%	22,2%	16,7%	33,3%
L'adozione di AGV (Automated Guided Vehicles) e di attrezzature intelligenti nel terminal contribuisce significativamente alla riduzione delle emissioni complessive, grazie all'ottimizzazione dei movimenti e delle operazioni logistiche.	11,1%	5,6%	5,6%	38,9%	16,7%	16,7%	5,6%

Tab. 5.2. Statistiche del questionario – distribuzione dei gradi di accordo in relazione ai benefici di implementazione

Analizzando i risultati del sondaggio riportati in *Tab. 5.2*, si evidenzia una percezione positiva verso l'integrazione dell'intelligenza artificiale (IA) nei terminal portuali, con un consenso significativo su determinate applicazioni. Per esempio, l'uso dell'IA per ottimizzare i movimenti nel piazzale e per l'assegnazione delle banchine e delle gru è ampiamente riconosciuto come un elemento cruciale per ridurre i costi operativi e i tempi di lavorazione, con la maggioranza delle risposte che si collocano nei punteggi più alti (6 e 7). Anche la gestione delle risorse umane e delle attrezzature tramite IA e i sistemi di supporto decisionale per la supply chain ottengono riscontri significativi, confermando l'interesse per una maggiore efficienza operativa. Complessivamente, i risultati indicano che l'IA è vista come una leva strategica per migliorare competitività e sostenibilità nei terminal, sebbene ci siano differenze nella valutazione dei benefici tra le varie applicazioni. Questi dati suggeriscono una chiara opportunità di investimento in specifici ambiti tecnologici già identificati come prioritari dagli operatori.

	1	2	3	4	5	6	7
I costi di acquisto dei sistemi intelligenti costituiscono un ostacolo all'adozione.	11,1%	0,0%	5,6%	38,9%	11,1%	16,7%	16,7%
I costi di manutenzione e aggiornamento dei sistemi intelligenti costituiscono un ostacolo all'adozione.	11,1%	11,1%	0,0%	50,0%	5,6%	16,7%	5,6%
I sistemi intelligenti richiedono una formazione prolungata e costosa del personale.	5,6%	27,8%	5,6%	11,1%	22,2%	11,1%	16,7%
I tempi necessari per il cambiamento di attitudine degli operatori della logistica marittimo-portuale verso l'adozione dell'IA saranno lunghi.	11,1%	11,1%	0,0%	0,0%	11,1%	27,8%	38,9%
Dimostrare la redditività di un investimento in IA nei terminal portuali è complesso.	5,6%	5,6%	5,6%	16,7%	16,7%	33,3%	16,7%
L'armonizzazione delle normative a livello nazionale e internazionale nel settore della logistica marittimo-portuale per l'uso dell'IA è complessa e richiede molto tempo.	0,0%	5,6%	0,0%	5,6%	5,6%	33,3%	50,0%
La complessità delle operazioni portuali non è adeguatamente compresa dall'IA, portando a soluzioni inaccurate o semplificate che non soddisfano le esigenze del terminal.	0,0%	27,8%	16,7%	33,3%	5,6%	16,7%	0,0%
L'assenza di dati accurati, affidabili e condivisi tra gli operatori della supply chain marittimo-portuale ostacola il corretto funzionamento dei sistemi IA all'interno del terminal.	0,0%	22,2%	0,0%	22,2%	5,6%	38,9%	11,1%
I vantaggi derivanti dall'uso di sistemi IA sono condizionati dalla capacità delle infrastrutture fisiche e digitali di cui sono dotati i terminal.	5,6%	11,1%	0,0%	5,6%	33,3%	16,7%	27,8%

Tab. 5.3. *Statistiche del questionario – distribuzione dei gradi di accordo in relazione ai limiti di implementazione*

I risultati delle domande sugli ostacoli riportati in *Tab. 5.3.* evidenziano diverse sfide percepite dagli operatori portuali nell'adozione dell'intelligenza artificiale (IA) nei terminal. I costi di acquisto e manutenzione dei sistemi intelligenti rappresentano un ostacolo significativo, con una concentrazione di risposte nei punteggi più alti, indicando una preoccupazione diffusa per gli investimenti iniziali e i costi di aggiornamento. Allo stesso modo, la necessità di una formazione specifica e prolungata del personale è considerata un fattore limitante, sebbene con una distribuzione delle risposte più equilibrata. Un'altra criticità rilevante riguarda i tempi lunghi per il cambiamento di mentalità degli operatori e la difficoltà di dimostrare la redditività di tali investimenti, aspetti che ottengono punteggi alti e riflettono le complessità legate al processo di transizione tecnologica. Anche l'armonizzazione delle normative nazionali e internazionali è percepita come una barriera importante, con molte risposte concentrate sui valori più elevati (tra 6 e 7), suggerendo un bisogno di maggiore standardizzazione e chiarezza regolatoria.

Altri ostacoli segnalati includono la complessità delle operazioni portuali e l'assenza di dati accurati e condivisi, entrambi ritenuti fattori che rallentano l'integrazione efficace dell'IA. Emerge infine che i vantaggi derivanti dall'uso dell'IA sono condizionati dalla qualità delle infrastrutture fisiche e digitali dei terminal, sottolineando l'importanza di un ecosistema tecnologico adeguato per massimizzare i benefici.

Da ciò si evince dunque che, sebbene l'IA sia vista come una tecnologia promettente, esistono ancora significative barriere operative, economiche e culturali che devono essere superate per favorirne un'adozione più ampia nei terminal portuali.

Al termine del questionario viene chiesto al rispondente se l'azienda di appartenenza prevede di effettuare investimenti in soluzioni tecnologiche basate sull'IA nei prossimi 3-5 anni specificando, nel caso, di cosa si tratta.

Dalle risposte fornite dai terminalisti emerge un panorama eterogeneo riguardo agli investimenti in innovazione nei terminal portuali. Alcuni operatori sottolineano che, al momento, la priorità è concentrata sulla logistica retroportuale e sull'ottimizzazione dei flussi logistici e dei dati commerciali. In alcuni casi, erano già stati avviati progetti di intelligenza artificiale, come per la gestione interna dei dati, ma sono stati interrotti a causa di problematiche legate alla sicurezza. Tuttavia, è prevista la ripresa di iniziative più avanzate e perfezionate, riconoscendo che l'adozione di IA è sempre più vista come una necessità competitiva sul mercato. Altri terminal, invece, indicano che non sono previsti investimenti significativi nel breve-medio termine, sebbene alcune aree specifiche, come la gestione dei depositi e lo sviluppo della supply chain, potrebbero essere oggetto di future valutazioni. Una realtà spicca per l'automatizzazione semi-completa e per l'implementazione di tecnologie avanzate, tra cui sistemi di digital twin e strumenti predittivi basati sull'intelligenza artificiale, a dimostrazione di come l'approccio innovativo vari sensibilmente tra i diversi contesti operativi. Infine, viene riconosciuta l'importanza della formazione e dello sviluppo di progetti mirati a specifici settori dell'ambito portuale.

V.2. Le testimonianze

Per approfondire e analizzare con maggiore dettaglio le opinioni e le percezioni dei terminalisti riguardo al tema dell'intelligenza artificiale, è stato adottato un ulteriore strumento qualitativo: l'intervista in profondità. Questo metodo ha coinvolto due terminalisti multipurpose, con una specializzazione nella movimentazione di merci containerizzate, operanti all'interno del sistema portuale del Mar Ligure Occidentale. La scelta di intervistare i manager di questi specifici terminal è motivata dalla loro rilevanza strategica rispetto all'intelligenza artificiale. I terminal multipurpose, e in particolare quelli focalizzati sulla movimentazione di container, si trovano ad affrontare sfide operative complesse e richiedono elevata rapidità e precisione nei processi. Questi elementi li rendono un contesto ideale per esplorare il potenziale dell'IA, che può supportare l'ottimizzazione dei flussi logistici, il miglioramento della sicurezza e l'implementazione di strumenti di pianificazione predittiva. Inoltre, il sistema portuale del Mar Ligure Occidentale si distingue per il suo ruolo strategico nelle reti logistiche italiane e internazionali e per l'attenzione crescente verso l'adozione di tecnologie avanzate, tra cui l'IA, come fattore determinante per migliorare l'efficienza e la competitività. Le testimonianze raccolte da questi terminalisti, operanti in un contesto altamente dinamico, offrono un contributo significativo per comprendere le percezioni, le opportunità e le sfide legate all'adozione dell'intelligenza artificiale nel settore portuale.

Lo scopo dell'intervista è allineato a quello del questionario: a partire dall'analisi della letteratura, si intende verificare in che misura gli esperti del settore concordino con i contenuti emersi. Tuttavia, a differenza del questionario, l'intervista mira a ottenere risposte più articolate e discorsive, consentendo un approfondimento qualitativo delle percezioni e delle opinioni, che può arricchire ulteriormente l'analisi complessiva. A comporre l'intervista sono domande sufficientemente aperte da consentire risposte anche da parte di soggetti con poca esperienza in ambito di intelligenza artificiale e, nello specifico, vanno ad inquadrare alcuni aspetti cruciali menzionati nello studio della letteratura. Si chiede in primo luogo all'intervistato di auto-assegnare un grado alla propria conoscenza del tema per poi entrare nel merito dei macro-argomenti (possibili

aree di implementazione, efficientamento operativo, sicurezza, sfide e resistenza all'adozione...).

V.2.1. I risultati delle interviste

Terminal 1

La conoscenza attuale dell'intelligenza artificiale (IA) e delle sue applicazioni da parte del Chief Information Officer soggetto dell'intervista è attualmente a livello ancora superficiale. Il dipartimento IT si concentra maggiormente sulla possibile implementazione di IA, fornendo l'esempio di un progetto precedentemente sviluppato. Finora, la maggiore innovazione tecnologica si è manifestata nel riconoscimento ottico dei contenitori in gate-in e nell'automazione dei processi di identificazione della merce. Il manager del terminal non distingue attività in cui l'IA possa avere maggiore opportunità di applicazione poiché trattasi di una tecnologia molto versatile. Può quindi essere potenzialmente utilizzata sia nelle operazioni di collegamento intermodale con altri mezzi di trasporto che nella gestione del carico sul fronte di banchina e di piazzale, nonché nell'identificazione di danni a carico e attrezzature. Generalmente si prevede che l'IA possa avere un ruolo efficace in qualsiasi ambito di tipo operativo.

In termini di efficienza operativa si afferma che l'IA possa ottimizzare i tempi di sosta delle navi per le operazioni di carico e scarico e ridurre le inefficienze operative in maniera indiretta. L'handling del carico è un'attività di natura prettamente fisica e lo spazio di manovra per la riduzione di inefficienze è limitato. Tuttavia, si prevede che l'IA possa offrire un significativo contributo alla pianificazione delle operazioni.

Un ambito nel quale il rispondente non pone particolare fiducia è quello della sostenibilità ambientale. Il ruolo che l'IA può svolgere nell'aumento della sostenibilità e nella contestuale diminuzione delle emissioni è infatti previsto in maniera piuttosto indiretta e l'effettivo impatto che l'ottimizzazione dei movimenti delle attrezzature tramite algoritmi intelligenti può avere è percepito come minimo.

Considerando invece il beneficio teorizzato dell'aumento della sicurezza dell'ambiente, il manager intervistato prevede che la sicurezza delle operazioni portuali possa giovare del supporto di intelligenza artificiale, in particolare nella prevenzione delle collisioni

delle attrezzature a piazzale. Gli algoritmi intelligenti basati su record storici possono assegnare a determinate movimentazioni un certo grado di rischio e organizzare gli spostamenti dei contenitori di conseguenza, fornendo così supporto alla gestione interna della sicurezza.

In tema di sfide all'implementazione, l'intervistato commenta come segue. Internamente al terminal vi è stato un tentativo di sviluppo di un sistema di IA volto all'elaborazione interna di dati. Procedendo con lo sviluppo una delle principali sfide emerse consisteva nel confinare l'accesso dell'IA a dati designati. Nonostante l'accesso ai dati fosse concesso manualmente, vi sono stati casi in cui l'IA derivava l'autorizzazione in maniera indiretta (Es.: Impiegato X effettua una videochiamata con Impiegato Y che ha accesso a dati sensibili. L'IA in questo caso interpreta la possibilità di comunicazione diretta tra i due soggetti come un'estensione ad impiegato X dell'autorizzazione di accesso ai dati sensibili di impiegato Y).

In relazione alla previsione di possibili comportamenti da parte dei collaboratori del terminal a fronte dell'implementazione di IA, ci si aspetta eventuale resistenza solo nel caso in cui la tecnologia vada a sostituire mansioni svolte tradizionalmente dall'essere umano. Tuttavia, in contesto di backoffice, si percepisce una generale apertura verso l'innovazione tecnologica anche nei casi in cui la tecnologia utilizzata prevede l'apprendimento di nuove competenze.

L'implementazione di strumenti IA potrebbe, risultare un processo complicato a seconda del tipo di applicazione, per cui è plausibile che diventi necessario, per una corretta adozione, elaborare un piano di formazione o di riqualificazione delle competenze dei collaboratori. L'intervistato esplica il concetto con l'esempio di un'ipotetica IA utilizzata per offrire soluzioni a soggetti esterni, la cui formulazione dei risultati deve essere accuratamente compresa dagli utilizzatori nella in modo da rendere l'utente in grado di motivare e giustificare le risposte offerte dall'algoritmo.

Secondo il rispondente, esistono attività per le quali l'IA potrebbe non essere adatta alla sostituzione di lavoro umano. Ne sono un esempio le operazioni di maneggiamento manuale del carico per il controllo fisico della merce, ovvero attività che, almeno nel breve periodo, non prevedono possibili tecnologie adatte a simili tipi di mansioni. È tuttavia possibile che mansioni e processi strettamente legati al lavoro umano possano essere guidati in un futuro prossimo dal supporto di strumenti intelligenti.

Infine, in relazione all'ostacolo delle risorse finanziarie necessarie per l'investimento, il manager afferma che è difficile assegnare a priori un'entità dell'investimento senza specificare algoritmo sottostante e applicazione. Generalmente i tool volti alla distribuzione commerciale rappresentano costi sotto forma di licenze poco ingenti perché diffuse universalmente su mercati ampi. Nei casi in cui però l'IA debba essere personalizzata essa deve essere sottoposta ad "addestramento" sui dati e sul contesto specifico del singolo terminal; un processo complesso e costoso. Altri tool che potrebbero risultare in investimenti di grande mole sono rappresentate da IA generative volte alla formulazione di scenari.

Attualmente il manager del terminal non è al corrente di casi di competitors che hanno implementato con successo strumenti intelligenti. Viene menzionato un altro terminal nello stesso sistema portuale, il quale essendo partecipato da grandi gruppi internazionali e potendo contare su fonti sostanziose di risorse, ha creato da più di un anno una divisione interna con lo scopo di sperimentare possibili applicazioni di IA. Secondo gli intervistati, i terminalisti italiani stanno attualmente attendendo, prima di effettuare investimenti, l'immissione sul mercato di intelligenze artificiali commerciali universali pensate appositamente per i sistemi portuali.

Oltre al progetto IA sviluppato internamente per la gestione interna dei dati, il quale è stato appunto interrotto a causa di problemi di sicurezza dei dati, è previsto lo sviluppo di un nuovo programma perfezionato. Si ritiene infatti che allo stato attuale della tecnologia, un'attività commerciale sia spinta dalla concorrenza a pubblicizzare l'implementazione di IA per rimanere sul mercato.

Terminal 2

La conoscenza attuale dell'IA da parte del Reliability Engineer²⁵ del secondo terminal è, come nel primo caso, ad un livello ancora superficiale. Tuttavia, viene presentato un caso di successo di implementazione di intelligenza artificiale volto all'ottimizzazione dei movimenti a magazzino e dell'aumento della sicurezza per gli operatori fisici. Si tratta

²⁵ Il Reliability Engineer è responsabile di garantire che i sistemi e gli equipaggiamenti operino in modo affidabile e efficiente, prevenendo guasti e migliorando le prestazioni attraverso l'analisi dei dati, lo sviluppo di strategie di manutenzione e la gestione dei rischi

dell'introduzione di sensori e videocamere posizionati sui muletti e integrati da tool IA, il cui scopo è prevenire collisioni con altri mezzi, ostacoli o persone. La logica di base consiste nell'evitare potenziali incidenti con il rilevamento della vicinanza e di movimenti degli ostacoli senza però irrigidire i movimenti dei muletti, ciò significa che il sistema intelligente può decidere se rallentare o arrestare il mezzo a seconda del tipo di ostacolo riconosciuto; un secondo muletto in transito potrebbe quindi rallentare il primo, mentre la presenza di personale autorizzato ad operare in stretto contatto con i mezzi viene riconosciuto tramite tag assegnati non inficia sul percorso effettuato. Un simile approccio permette quindi di ottimizzare gli spostamenti a magazzino, aumentare la sicurezza dell'ambiente e al contempo di efficientare l'operatività evitando soste superflue e prendendo in considerazione solamente anomalie ben specifiche. Implicita rispetto alla presentazione di un simile utilizzo è l'opinione del rispondente sulla possibilità di utilizzare l'IA in ambito portuale per il rinforzo delle misure di sicurezza. Al di fuori di tale utilizzo però, il terminal non sta attualmente studiando ulteriori possibili implementazioni.

Tra le aree del terminal di interesse per l'intelligenza artificiale, quella che vede, secondo l'intervistato, maggiore opportunità di implementazione è il piazzale. Si considera infatti l'utilità dell'utilizzo di AGV intelligenti, i quali, ad avviso del rispondente, contribuirebbero sostanzialmente all'ottimizzazione degli spostamenti ed alla conseguente riduzione dei costi operativi. Il terminal gioverebbe in fatti in particolare di una rete sinergica di AGV in grado di operare alla massima efficienza e di aumentare la produttività in maniera dinamica rispetto alle fasce temporali di picco tramite lo studio e l'apprendimento automatizzato dei dati storici.

La fiducia dell'intervistato verso l'adozione di una simile tecnologia è particolarmente sentita, poiché è già stato dimostrato in passato come l'utilizzo di tecnologia (sia puramente informatica sia applicata ai mezzi) abbia un riflesso diretto sull'efficienza delle operazioni e su un grande numero di KPI. Da parte dei lavoratori, tuttavia, tale fiducia non è da considerarsi garantita. In generale la resistenza al cambiamento è una caratteristica intrinseca dell'uomo. Premettendo che l'approccio è in stretta correlazione all'utilizzo dell'IA, è essenziale chiarire internamente all'organizzazione, che il tipico timore della sostituzione del lavoro umano è fondato e che anche se una possibile mansione dovesse essere svolta da un nuovo sistema automatizzato, bisogna considerare

che si creerebbe in parallelo una nuova mansione volta al supporto, alla manutenzione e al funzionamento della macchina. È dunque fondamentale seguire, in fase di adozione, le teorie del *change management*, per le quali è essenziale coinvolgere attivamente le persone appartenenti all'organizzazione, rendendole partecipi ed eliminando il rischio di possibile malcontento interno. Il rispondente sostiene, inoltre, che un piano di formazione e riqualificazione sia imprescindibile a fronte dell'introduzione di una nuova tecnologia. In tema di sostenibilità ambientale, il terminal intervistato afferma che gli ambiti da prioritizzare nell'utilizzo dell'intelligenza artificiale sono altri. Ciò non è dovuto alla sottovalutazione della questione ambientale, bensì alla natura della tecnologia stessa, la quale è concepita principalmente per la massimizzazione dell'efficienza e per l'ottimizzazione del rapporto tra input e output del servizio. Si pone quindi generalmente maggiore attenzione su attività come la pianificazione operativa. Si consideri però che un aumento dell'efficienza generale genera collateralmente ricadute positive sulla sostenibilità del terminal - l'intervistato offre infatti l'esempio della singola nave, che giovando dei tempi di sosta ridotti non necessita di aumentare i nodi in viaggio per raggiungere il porto successivo portando le conseguenti emissioni a ridursi.

Si menziona infine l'ostacolo della mole di investimento per l'ottenimento di strumenti di intelligenza artificiale. Ad avviso del rispondente l'investimento può rappresentare generalmente una fonte di scoraggiamento all'implementazione soprattutto nei casi in cui il terminal è di piccole medie dimensioni, non si tratta tuttavia dell'unico ostacolo da affrontare nelle prime fasi dell'adozione. Si pensi infatti alla combinazione tra risorse finanziarie necessarie, addestramento dell'intelligenza, ristrutturazione dei sistemi informatici e sforzo delle risorse umane nella gestione del cambiamento. Diventa così essenziale lo studio dell'economicità dell'investimento insieme alla formulazione di un adeguato piano di investimento in modo da poter provare concretamente un congruo ritorno dell'investimento.

Il responsabile intervistato conclude affermando di non essere a conoscenza di altri casi di successo di implementazione di IA in ambito portuale, né tantomeno di altri terminal in fase di sperimentazione.

VI. Conclusioni

È opportuno, a questo punto, trarre delle conclusioni sull'argomento con focus sul confronto tra letteratura scientifica ed effettive prese di posizione dei terminalisti.

Dai risultati di questionario ed interviste emerge, infatti, una percezione generalmente positiva sull'adozione dell'intelligenza artificiale nell'ambiente del terminal portuale. I rispondenti esprimono e giustificano un buon livello di accordo sui benefici che l'IA può offrire come già indicato in *Tab. 5.2* e *Tab. 5.3*.

Il possibile utilizzo di tool di IA volto all'ottimizzazione delle operazioni a piazzale suscita un alto grado di accordo, rendendolo uno degli ambiti in cui l'intervento di intelligenze artificiali è maggiormente apprezzabile come precedentemente sottolineato da *Maldonado et al. 2019*.

Meno sentito è l'impatto che gli strumenti intelligenti possono avere sulle operazioni di assegnazione delle navi alle banchine e delle relative attrezzature. Alcuni dei rispondenti condividono in maniera moderata l'entità di tale beneficio, mentre una minoranza di essi non riconosce la potenzialità dell'IA per un simile tipo di operazione. Ciò va quindi in contrasto con quanto esposto dagli autori che trattano il problema dell'assegnamento di attrezzature come *De León et al. 2017* e *Pratap et al. 2017*

Per quanto riguarda l'implementazione di IA a supporto della gestione delle risorse umane e delle attrezzature, i rispondenti si concentrano sulla via di mezzo tra accordo e disaccordo, suggerendo una generale e diffusa incertezza sulle effettive possibilità di applicazione dell'innovazione in questo senso.

L'uso di sistemi di supporto decisionale intelligenti per gestire il flusso di merci e migliorare la gestione della supply chain è percepito come un beneficio dalla quasi totalità dei rispondenti, dividendosi però tra chi condivide maggiormente l'effetto del beneficio e chi lo percepisce in proporzione più lieve.

Anche l'assistenza dell'IA nella condivisione di informazioni tra terminal e fornitore di trasporto trova generale consenso tra i rispondenti, comprendendo un lieve grado di incertezza ma anche accordo moderato e totale, offrendo così validità alle argomentazioni a favore di IA di supporto alla negoziazione presentate da *Rau H. et al. 2006*.

Segue la possibilità di vedere un maggiore equilibrio tra domanda e offerta che caratterizzano l'attività del terminal portando ad una riduzione dei tempi di attesa dei mezzi (lato mare così come lato terra). In questo caso i rispondenti sembrano presentare un livello di accordo più moderato portando alcuni terminalisti ad essere anche lievemente in disaccordo.

A trovare meno consenso è anche il beneficio derivante dalla generazione di scenari realistici quale supporto per la pianificazione operativa. Nonostante in letteratura sia motivata l'efficacia della pianificazione con approccio a scenario, da parte dei terminalisti il diffuso accordo è accompagnato da altrettanta inaspettata incertezza sulla validità dell'affermazione.

L'utilizzo di sensori applicati alle attrezzature con lo scopo di effettuare manutenzione predittiva raccoglie invece grande consenso. Si tratta infatti di un'attività generalmente onerosa, per cui un supporto volto alla minimizzazione dei costi e al giusto tempismo della manutenzione è fortemente apprezzata. Come emerge inoltre dall'intervista, la manutenzione predittiva, come presentato da *Le A. V. et al. 2021*, rappresenta l'investimento in IA in ambito portuale che attrarre attualmente maggiore interesse da parte di armatori e terminal.

Infine, il beneficio della riduzione delle emissioni complessive del terminal grazie all'introduzione di AGV intelligenti, come evidenziato da *Tsolakis et al. (2022)*, trova la maggior parte dei terminalisti in disaccordo. Ciò ha con grande probabilità a che fare con l'entità dell'impatto ambientale che l'ottimizzazione dei movimenti a piazzale può avere e con il modo eccessivamente indiretto in cui la riduzione di emissioni si manifesta (come sottolineato nell'intervista).

Nonostante i rispondenti percepiscano la maggior parte dei benefici come effettivi e plausibili, anche una buona proporzione di ostacoli è ritenuta realistica dal pool di terminalisti raggiunti. Vi è comunque un senso di scetticismo verso l'entità di suddetti ostacoli.

Come specificato dal primo terminalista intervistato, i costi di acquisto di sistemi intelligenti non rappresenta necessariamente un ostacolo all'adozione dell'innovazione, poiché la mole dell'investimento varia sensibilmente rispetto all'algoritmo utilizzato e

all'ambito di applicazione, per cui non si tratta di un ostacolo condiviso da tutti i terminal a contrario di quanto attesi da *Zaman et al. (2014)*.

A non essere percepito come un ostacolo significativo è il costo di manutenzione e aggiornamento degli strumenti di intelligenza artificiale, probabilmente perché comparati rispetto agli stessi costi sostenuti per le immobilizzazioni materiali del terminal, la cui entità esercita già un forte impatto a bilancio.

Solo alcuni dei rispondenti percepiscono i costi di formazione per l'utilizzo dei sistemi intelligenti da parte dei collaboratori interni come una limitazione alla diffusione dell'innovazione, infatti la maggior parte, come evidenziato espressamente nelle interviste, ritiene che la formazione interna rispetto all'introduzione di nuove tecnologie risulti allo stato attuale agevole e rapida. Ciò ha a che fare con i ritmi sempre più rapidi dello sviluppo della tecnologia utilizzata quotidianamente in ambito lavorativo e non.

Come premesso da *Besikçi et al. (2016)*, un vero e proprio ostacolo, in base a quanto riportato dai terminal, è invece dato dalla rigidità di attitudine degli operatori del settore marittimo portuale, ovvero un settore temprato dalla tradizione. A differenza dell'introduzione dell'innovazione del container degli anni '60, il commercio internazionale attuale presenta un forte grado di rigidità rispetto ad ulteriori innovazioni potenzialmente dirompenti poiché l'efficienza a cui puntano gli operatori fonda le sue radici nella standardizzazione dell'intero settore dei trasporti.

Pressoché la totalità dei rispondenti considera come uno dei principali ostacoli l'armonizzazione della normativa in materia di intelligenza artificiale applicata al contesto portuale su scala globale. L'ostacolo in sé non riguarda i contenuti della normativa stessa quanto più la lunghezza delle tempistiche necessarie a trovare testi norme univoche che permettano un bilanciamento internazionale della legislazione.

Rispetto al rischio considerato in letteratura dell'inaccuratezza delle soluzioni offerte dall'IA causate dall'intrinseca complessità delle operazioni portuali, i rispondenti non considerano in primo luogo le operazioni ordinarie come "complesse", per cui ci si aspetta che l'IA sia comunque in grado di gestire correttamente i dati e le informazioni generati. Continuando in tema di elaborazione di informazioni, la letteratura ricorda che l'imprecisione dei dati condivisi tra operatori della supply chain rischia di inficiare sul corretto funzionamento dei sistemi IA generando soluzioni incomplete o non idonee. Tale

affermazione spartisce i rispondenti tra vari gradi di accordo e disaccordo, trovando in alcuni casi totale consenso, in altri nessuno ed in ulteriori casi incertezza.

Infine, si considera l'ostacolo delle limitazioni fisiche infrastrutturali del terminal. Nonostante qualche terminalista sia in disaccordo, la maggior parte di essi condivide come espresso da *Ngai et al. (2011)*, totalmente o meno, che gli effetti positivi derivanti dall'uso di IA nel terminal possono manifestarsi solamente nella misura in cui le condizioni infrastrutturali lo consentano.

I risultati offrono così, in conclusione, un contributo significativo sia in ambito teorico che pratico, illuminando sulle potenzialità e delle sfide connesse all'adozione dell'intelligenza artificiale (IA) nei terminal portuali, un'innovazione che, come evidente, sta assistendo ai suoi stessi albori.

I commenti lasciati dai rispondenti in relazione ai piani di investimento in IA (o altre innovazioni) nel breve-medio termine sottolineano inoltre quanto già intuito dallo studio della letteratura scientifica. La maggior parte dei piani di investimento si trovano ancora in uno stato di prova o come in alcuni casi sono già stati effettuati tentativi con esiti non del tutto soddisfacenti. Ciò significa che non solo nella teoria, ma anche nella pratica, l'IA in ambito marittimo portuale sta attraversando la fase iniziale comune alle innovazioni della sperimentazione. Non sono ancora stati definiti standard tecnologici, non si assiste ancora all'iniziale diffusione di uno strumento intelligente specifico, bensì studiosi, ricercatori ed operatori stessi effettuano tentativi volti alla risoluzione di problemi di varia natura, operando in ambiti anche significativamente diversi. Rispetto ciclo di vita di un'innovazione come elaborato nel c.d. "Hype Cycle" di Gartner²⁶ (1995) si potrebbe dunque affermare che l'IA in ambito marittimo portuale si trovi nelle prime fasi del "technology trigger" come indicato in Fig. 6.1., ovvero il momento in cui l'innovazione nasce a seguito della capacità tecnologica:

²⁶ Modello ideato dalla società di ricerca Gartner per descrivere l'adozione e la maturità delle tecnologie emergenti e il loro potenziale impatto. Rappresenta graficamente il ciclo di vita delle tecnologie e delle innovazioni, evidenziando come queste attraversino fasi di aspettative e disillusioni, fino a raggiungere un equilibrio più realistico tra le promesse iniziali e i risultati effettivi.

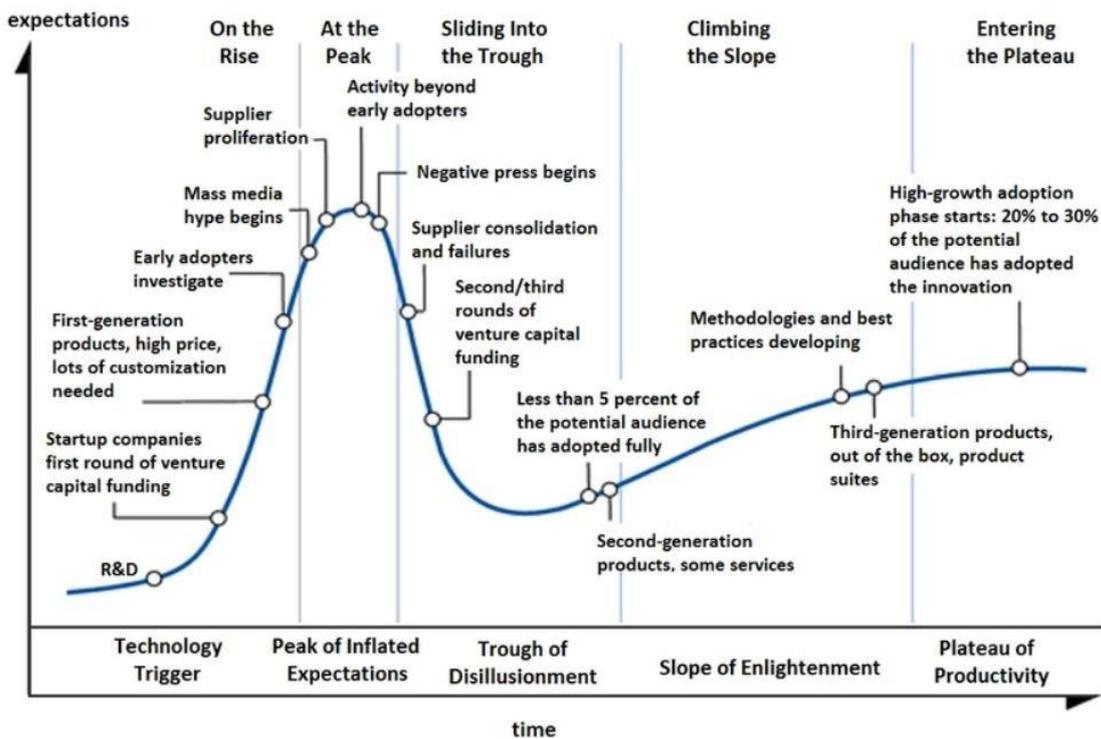


Fig. 6.1. *Hype cycle di Gartner - Popupmag.it*

In senso teorico, il presente lavoro sistematizza quindi e amplia le conoscenze attualmente diffuse tra studiosi e ricercatori, evidenziando i principali ambiti applicativi della tecnologia, i benefici attesi e le barriere percepite. Si contestualizza in questo modo lo stato corrente dell'adozione dell'IA, sottolineando inoltre come il settore stia vivendo un momento di transizione, in cui sperimentazioni e progetti pilota prevalgono rispetto alla diffusione su larga scala e alla standardizzazione tecnologica.

Un altro contributo è quindi dato dall'analisi della relazione tra benefici e limitazioni percepite, la quale richiama l'attenzione su un equilibrio critico tra l'interesse per l'opportunità offerta dall'IA e lo scetticismo riguardo alle sfide tecniche, finanziarie, normative che ne ostacolano l'adozione. Questo equilibrio fornisce una nuova prospettiva sul ruolo che gli stakeholder giocano nel guidare o accogliere l'innovazione, suggerendo che la transizione verso una fase più matura dipenderà non solo dal progresso tecnologico, ma anche da cambiamenti culturali e strategici all'interno del settore.

Dal punto di vista pratico, invece, si integrano i risultati teorici con l'analisi empirica basata su questionari e interviste volti ad attori appartenenti al contesto

marittimo portuale italiano. Tale doppia indagine sul campo ha consentito di verificare e arricchire i risultati emersi in letteratura, evidenziando l'allineamento delle percezioni degli operatori con i contenuti proposti. In particolare, le testimonianze hanno evidenziato che, sebbene ci sia un interesse diffuso per l'adozione dell'IA, i limiti economici, organizzativi e normativi sono percepiti come ostacoli di notevole portata, al punto da bilanciare o addirittura, in alcuni casi, superare i benefici percepiti. Questo dato pratico offre un quadro chiaro delle priorità che dovrebbero essere affrontate per accelerare il processo di trasformazione tecnologica.

La tesi contribuisce a colmare il divario tra teoria e pratica, fornendo un'analisi integrata che può servire come base per ulteriori ricerche e interventi operativi. Sul piano teorico, offre una maggiore comprensione dello stato dell'arte dell'IA nei terminal portuali, contestualizzandolo in un framework più ampio di innovazione tecnologica. Sul piano pratico, fornisce agli stakeholder del settore – inclusi operatori, decisori politici e ricercatori – strumenti analitici e spunti strategici per affrontare le sfide attuali e valorizzare le opportunità future. In un momento storico in cui la trasformazione tecnologica è cruciale per la competitività del settore portuale, la tesi potrebbe rappresentare un punto di partenza per promuovere uno sviluppo più consapevole, mirato e sostenibile.

Un limite significativo dell'elaborato, risiede tuttavia nella dimensione e nella composizione del campione utilizzato per i questionari e le interviste, limitato al sistema portuale del Mar Ligure Occidentale. Per futuri sviluppi successivi della ricerca, sarebbe utile ampliare l'analisi a un campione più esteso e diversificato, includendo terminal portuali situati in contesti geografici e operativi differenti, al fine di verificare l'universalità dei risultati ed identificare eventuali variabili locali che influenzano l'adozione dell'IA. Inoltre, l'integrazione di ulteriori interviste con esperti del settore, come fornitori di tecnologie, policy maker e accademici, potrebbe offrire una prospettiva più approfondita e multidisciplinare sui temi emersi, contribuendo a delineare con maggiore precisione le dinamiche di implementazione e i fattori critici di successo. Un'altra prospettiva di approfondimento potrebbe riguardare l'adozione di un'analisi longitudinale, che permetterebbe di osservare l'evoluzione dell'introduzione delle tecnologie di intelligenza artificiale nei terminal portuali e di valutarne l'impatto nel lungo termine. Questo approccio consentirebbe di identificare non solo i benefici e le criticità

immediate, ma anche le conseguenze strutturali e sistemiche che queste innovazioni potrebbero avere sull'intero settore portuale. Tali sviluppi futuri, combinando una maggiore ampiezza del campione e un'analisi temporale più estesa, contribuirebbero a consolidare le conoscenze esistenti e a fornire indicazioni strategiche più solide per gli operatori e i decisori coinvolti.

VII. Bibliografia:

- Munim Z.H.; Dushenko M.; Jimenez V.J.; Shakil M.H.; Imset M.; 2020, “Big data and artificial intelligence in the maritime industry: a bibliometric review and future research directions”, *Maritime Policy and Management*
- Bal Beşikçi E.; Arslan O.; Turan O.; Ölçer A.I.; 2016, “An artificial neural network based decision support system for energy efficient ship operations”, *Computers and Operations Research*
- Schanke S.; Burtch G.; Ray G.; 2021, “Estimating the impact of “humanizing” customer service chatbots”, *Information Systems Research*
- Bulut E.; Duru O.; Keçeci T.; Yoshida S.; 2014, “Use of consistency index, expert prioritization and direct numerical inputs for generic fuzzy-AHP modeling: A process model for shipping asset management”, *Journal of Simulation*
- Zaman M.B.; Kobayashi E.; Wakabayashi N.; Khanfir S.; Pitana T.; Maimun A.; 2009, “Fuzzy FMEA model for risk evaluation of ship collisions in the Malacca Strait: Based on AIS data”, *Decision Support Systems*
- Bandeira D.L.; Becker J.L.; Borenstein D.; 2012, “A DSS for integrated distribution of empty and full containers”, *Expert Systems with Applications*
- Duru O.; Bulut E.; Yoshida S.; 2020, “A fuzzy extended DELPHI method for adjustment of statistical time series prediction: An empirical study on dry bulk freight market case”, *Journal of Intelligent Manufacturing*
- Li Z.; Barenji A.V.; Jiang J.; Zhong R.Y.; Xu G.; 2017, “A mechanism for scheduling multi robot intelligent warehouse system face with dynamic demand”,
- de León A.D.; Lalla-Ruiz E.; Melián-Batista B.; Marcos Moreno-Vega J.; “A Machine Learning-based system for berth scheduling at bulk terminals” *Journal of Intelligent Manufacturing*
- Chen C.-H.; Khoo L.P.; Chong Y.T.; Yin X.F.; 2014, “Knowledge discovery using genetic algorithm for maritime situational awareness”, *Expert Systems with Applications*

- Wibowo S.; Deng H.; 2012, “Intelligent decision support for effectively evaluating and selecting ships under uncertainty in marine transportation”, *Expert Systems with Applications*
- Maldonado S.; González-Ramírez R.G.; Quijada F.; Ramírez-Nafarrate A.; 2019, “Analytics meets port logistics: A decision support system for container stacking operations”, *Decision Support Systems*
- Ursavas E.; 2014, “A decision support system for quayside operations in a container terminal”, *Decision Support Systems*
- Lokuge P.; Alahakoon D.; 2007, “Improving the adaptability in automated vessel scheduling in container ports using intelligent software agents”, *European Journal of Operational Research*
- Pratap S.; Nayak A.; Kumar A.; Cheikhrouhou N.; Tiwari M.K.; 2017, “An integrated decision support system for berth and ship unloader allocation in bulk material handling port”, *Computers and Industrial Engineering*
- Fazi S.; Fransoo J.C.; Van Woensel T.; 2015 “A decision support system tool for the transportation by barge of import containers: A case study”, *Decision Support Systems*
- Ngai E.W.T.; Li C.-L.; Cheng T.C.E.; Lun Y.H.V.; Lai K.-H.; Cao J.; Lee M.C.M.; 2011, “Design and development of an intelligent context-aware decision support system for real-time monitoring of container terminal operations”, *International Journal of Production Research*
- Castilla-Rodríguez I.; Expósito-Izquierdo C.; Melián-Batista B.; Aguilar R.M.; Moreno-Vega J.M.; 2020, “Simulation-optimization for the management of the transshipment operations at maritime container terminals”, *Expert Systems with Applications*
- Tsolakis N.; Zissis D.; Papaefthimiou S.; Korfiatis N.; 2022, “Towards AI driven environmental sustainability: an application of automated logistics in container port terminals”, *International Journal of Production Research*
- Min H.; 2022, “Developing a smart port architecture and essential elements in the era of Industry 4.0”, *Maritime Economics and Logistics*
- Yang Z.; Mehmed E.E.; 2019, “Artificial neural networks in freight rate forecasting”, *Maritime Economics and Logistics*

- Rau H.; Tsai M.-H.; Chen C.-W.; Shiang W.-J.; 2006, “Learning-based automated negotiation between shipper and forwarder”, *Computers and Industrial Engineering*
- Le A.V.; Veerajagadheswar P.; Kyaw P.T.; Viraj J. Muthugala M.A.; Elara M.R.; Kuma M.; Khanh Nhan N.H.; 2021, “Towards optimal hydro-blasting in reconfigurable climbing system for corroded ship hull cleaning and maintenance”, *Expert Systems with Applications*
- Cremen G.; Bozzoni F.; Pistorio S.; Galasso C.; 2022, “Developing a risk-informed decision-support system for earthquake early warning at a critical seaport”, *Reliability Engineering and System Safety*
- Mar-Ortiz J.; Castillo-García N.; Gracia M.D.; 2020, “A decision support system for a capacity management problem at a container terminal”, *International Journal of Production Economics*
- Legato P.; Mazza R.M.; 2018, “A decision support system for integrated container handling in a transshipment hub”, *Decision Support Systems*
- Foster M.N.; Rhoden S.L.N.H.; 2020, “The integration of automation and artificial intelligence into the logistics sector: A Caribbean perspective”, *Worldwide Hospitality and Tourism Themes*
- Giachetti R.E.; Damodaran P.; Mestry S.; Prada C.; 2013, “Optimization-based decision support system for crew scheduling in the cruise industry”, *Computers and Industrial Engineering*
- El Mekkaoui S.; Benabbou L.; Berrado A.; 2023, “Deep learning models for vessel’s ETA prediction: bulk ports perspective”, *Flexible Services and Manufacturing Journal*
- García-Fernández I.; Martín-Guerrero J.D.; Pla-Castells M.; Soria-Olivas E.; Martínez-Durá R.J.; Muñoz-Marí J.; 2004, “Crane collision modelling using a neural network approach”, *Expert Systems with Applications*
- Kjeldsberg F.; Haque Munim Z.; 2024, “Automated machine learning driven model for predicting platform supply vessel freight market”, *Computers and Industrial Engineering*
- L. Heilig; S. Vos; 2023, “Information systems in seaports: a categorization and overview”, *WMU Journal of Maritime Affairs*

- Filippo Sanfilippo; Lars Ivar Hatledal; Kristin Ytterstad Pettersen; Houxiang Zhang; 2017, “A Benchmarking Framework for Control Methods of Maritime Cranes Based on the Functional Mockup Interface”, IEEE Journal of Oceanic Engineering