



Provincia  
di Piacenza

**PROGETTO DI INDAGINE SULLA LOGISTICA NELLA REALTÀ PIACENTINA:  
RAPPORTI CON L'ECONOMIA, LA SOCIETÀ, L'AMBIENTE E IL TERRITORIO E  
INDICAZIONI DI POLICY PER GLI ENTI LOCALI – 2025**

## **PRINCIPALI MACROTREND DEL COMPARTO LOGISTICO**

A cura di Fondazione ITL – Istituto sui trasporti e la logistica e  
Politecnico di Milano – Polo di Piacenza

## Provincia di Piacenza

### Presidente

*Monica Patelli*

### Responsabile del progetto

*Vittorio Silva*

### Staff

*Giovanna Baiguera, Rosella Caldini, Antonio Colnaghi, Sara Ferrari, Barbara Leoni, Vincenza Ruocco, Valeria Toscani*

## Contributi specialistici esterni

### Consorzio Poliedra - Politecnico di Milano

*Silvia Arcari, Alessandra Cappiello, Selene Cremonesi, Alessandro Luè, Silvia Pezzoli, Cristina Ragazzi, Claudia Romelli, Silvia Vaghi*

### Fondazione ITL – Istituto sui trasporti e la logistica

*Andrea Bardi, Antonio Dallara, Daniela Mignani  
con Luca Cannava e Sara Perotti (Politecnico di Milano)*

### Nomisma SpA

*Giulia Bassani, Cristina Bernini, Francesco Capobianco, Johnny Marzialetti, Chiara Pelizzoni, Paola Piccioni, Eleonora Spina, Elisabetta Tarroni*

### Politecnico di Milano - Polo territoriale di Piacenza > DASTU - Dipartimento di Architettura e Studi Urbani

*Simonetta Armondi, Stefano Di Vita, Beatrice Mosso, Silvia Ronchi, Samuele Silvestri*

### Università Cattolica del Sacro Cuore > LEL - Laboratorio di Economia Locale di Piacenza

*Barbara Barabaschi, Enrico Ciciotti, Paolo Rizzi, Lorenzo Turci  
con Giuseppe Gambazza (Università degli Studi di Milano Statale)*



## Indice

<b>1. Introduzione</b> .....	2
<b>2. Principali trend nel settore della logistica</b> .....	4
<b>2.1. Digitalizzazione e automazione</b> .....	4
<b>2.1.1. Magazzini automatici</b> .....	6
<b>2.1.2. Innovazione tecnologica nei terminal multimodali</b> .....	9
<b>2.1.3. Focus: materiale rotabile</b> .....	12
<b>2.2 Sostenibilità ed efficienza energetica</b> .....	13
<b>2.2.1. Strategie di sostenibilità e metodologie di assessment</b> .....	14
<b>2.2.2. Decarbonizzazione dei trasporti e multimodalità</b> .....	18
<b>2.2.3. Sostenibilità ed efficienza energetica degli insediamenti ad uso logistico</b> .....	22
<b>2.3 La Logistica 5.0 e l’approccio human centric</b> .....	25
<b>Riferimenti</b> .....	29
<b>Appendice: nota metodologica</b> .....	33

# 1. Introduzione

Il settore della logistica riveste un ruolo strategico nell'economia globale e nazionale, fungendo da tessuto connettivo dei sistemi produttivi e distributivi. Oltre a garantire l'efficienza nei flussi di beni e servizi, la logistica rappresenta un pilastro fondamentale per la competitività delle aziende, soprattutto in un contesto sempre più interconnesso e dinamico. La sua importanza si riflette nella crescente attenzione e pressioni che riceve da parte degli stakeholder – istituzioni, policy-maker, imprese – in quanto leva critica per la transizione verso un'economia più sostenibile, digitale e resiliente (Commissione Europea, 2021). Al contempo, il settore logistico è anche esposto a una serie di sfide. Da un lato, l'aumento della complessità delle supply chain dovuto all'outsourcing e alla delocalizzazione ha reso i processi logistici più frammentati e vulnerabili a discontinuità operative. Dall'altro lato, si assiste ad una importante crescita dell'e-commerce e dell'omnicanalità, accompagnata da una sempre più elevata domanda in termini di livello di servizio da parte dei clienti, con tempi attesi di risposta sempre più ridotti e crescenti livelli di customizzazione degli ordini. In questo contesto, l'esplosione dell'e-commerce ha rimodellato i flussi distributivi, favorendo il decentramento dei magazzini e l'aumento delle consegne ad ultimo miglio (last-mile delivery). In secondo luogo, il paradigma dell'omnicanalità ha imposto nuovi standard di servizio, con una crescente pressione su velocità, tracciabilità e flessibilità dei trasporti. A ciò si aggiungono pressioni normative sempre più stringenti, spinte verso la decarbonizzazione ed esigenze crescenti da parte dei consumatori in termini di servizio, tempi di consegna e responsabilità ambientale. In tale contesto, la sostenibilità è diventata un driver fondamentale per la logistica, spingendo aziende e operatori a rivedere le strategie di trasporto merci, i vettori utilizzati e i modelli di misurazione dell'impatto ambientale.

Nel contesto italiano, il settore della logistica presenta specificità che ne aumentano la complessità gestionale e strategica. Secondo i dati del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2025), la logistica in Italia rappresenta circa l'8,5% del PIL nazionale, con un fatturato complessivo stimato in oltre 117,8 miliardi di € per il 2024. Annualmente si movimentano più di 200 milioni di ton-km di merci, con una rete logistica caratterizzata da una densità di traffico merci su gomma più elevate d'Europa (Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, 2025). Le merci percorrono mediamente oltre 200 milioni di ton-km ogni anno, con una elevata incidenza del trasporto su strada rispetto a modalità più sostenibili come ferro (impianti fissi) e mare (vie d'acqua).

*Milioni di tonnellate-km*

Modalità di trasporto	2005	2010	2015	2019	2020	2021	2022	2023
Impianti fissi <sup>(2)</sup> <sup>(3)</sup>	33.668	28.222	29.571	31.005	29.457	33.087	33.275	31.256
Su strada <sup>(4)</sup>	155.872	134.261	95.513	114.417	110.246	120.215	123.126	124.074
Vie d'acqua <sup>(5)</sup>	46.928	53.291	51.206	58.030	57.417	53.752	44.306	42.228
Navigazione aerea	982	1013	1.085	1.216	929	1.213	1.236	1.220
<b>Totale</b>	<b>237.450</b>	<b>216.787</b>	<b>177.376</b>	<b>204.668</b>	<b>198.049</b>	<b>208.267</b>	<b>201.943</b>	<b>198.777</b>

*In corsivo i dati stimati - Le somme possono non coincidere con i totali a causa degli arrotondamenti.*

(1) Sono considerati gli spostamenti di merce realizzati da vettori nazionali con origine e destinazione interne al territorio italiano. Per il traffico ferroviario e per oleodotto è compresa anche la quota dei traffici internazionali realizzata su territorio nazionale. La tabella è costruita utilizzando serie di dati di fonti diverse desunti da indagini condotte con metodologie e sistemi tra loro non comparabili.

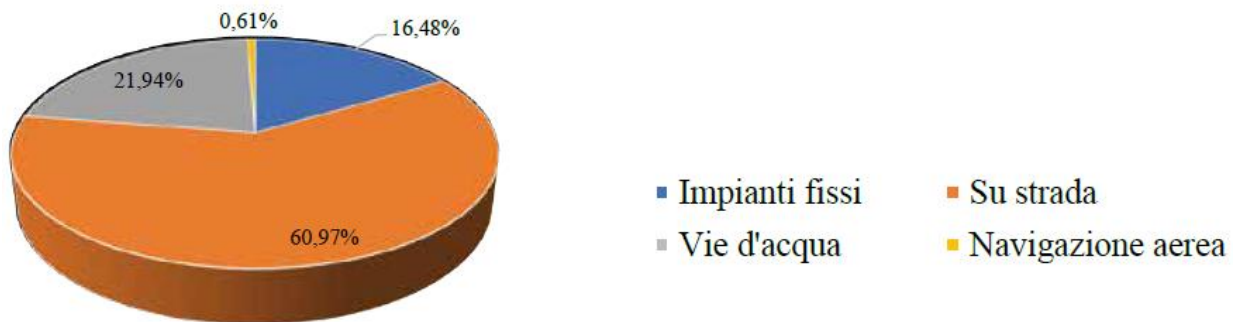
(2) La merce trasportata, come richiesto dal Regolamento di riferimento UE, non include il peso dei carri privati vuoti.

(3) Non sono compresi gli spostamenti delle locomotive singole.

(4) Autotrasporto non inferiore a 50 Km.

(5) Comprende la navigazione marittima e quella per vie di acqua interne.

**Tabella 1.** Traffico totale interno di merci per modalità di trasporto. Fonte: Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2025).



**Figura 1.** Ton-km di traffico totale interno di merci per modalità di trasporto. Fonte: Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2025).

In questo contesto, la logistica si configura come uno dei settori più impattanti dal punto di vista ambientale sia a livello nazionale che globale. A livello globale, il trasporto rappresenta circa il 24% delle emissioni complessive di CO<sub>2</sub>e, di cui il trasporto merci incide fino al 40% (Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, 2025; ISPRA, 2025; International Energy Agency, 2023). In Italia, nel 2023 il settore logistico è stato responsabile del 28,3% delle emissioni totali nazionali di CO<sub>2</sub>e e del 35,3% delle emissioni del settore energetico (ISPRA, 2025). Questo risultato è legato anche alla presenza di una struttura di mercato frammentata, con un'alta incidenza di piccoli operatori e un utilizzo ancora limitato di modalità di trasporto sostenibili. Nello specifico, l'elevata dipendenza dal trasporto su strada incide fortemente e negativamente sulle emissioni totali. A questo proposito, con riferimento allo Scope 1, le quote di emissioni di CO<sub>2</sub>e dei diversi modi di trasporto sono rispettivamente 92,6% per il trasporto su strada, 4,3% per la navigazione interna, 2,2% per l'aviazione nazionale, 0,9% per le condutture di trasporto e 0,04% per le ferrovie (gasolio) (ISPRA, 2025).

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
CO <sub>2</sub> Mt CO <sub>2</sub> eq	100.32	111.53	121.64	126.78	114.63	105.59	85.64	101.85	107.89	107.94
CH <sub>4</sub> Mt CO <sub>2</sub> eq	1.01	1.13	0.86	0.56	0.33	0.24	0.16	0.17	0.17	0.17
N <sub>2</sub> O Mt CO <sub>2</sub> eq	0.86	1.55	1.45	1.01	0.95	0.85	0.72	0.85	0.89	0.89
<b>Total, Mt CO<sub>2</sub> eq.</b>	<b>102.19</b>	<b>114.22</b>	<b>123.95</b>	<b>128.36</b>	<b>115.90</b>	<b>106.68</b>	<b>86.52</b>	<b>102.87</b>	<b>108.95</b>	<b>108.99</b>

**Tabella 2.** Emissioni di gas a effetto serra (GHG) nel settore dei trasporti in Italia. Fonte: ISPRA (2025).

Miglioramenti significativi in termini di performance ambientale possono derivare da un uso più efficiente dei veicoli, da una maggiore saturazione dei mezzi, da una ottimizzazione delle rotte di trasporto, dall'uso di combustibili a basso impatto ambientale e da una più ampia adozione del trasporto intermodale.

Alla luce di tali sfide, emergono nuove esigenze che richiedono un'evoluzione della logistica. Sempre più sta emergendo il paradigma della "Logistica 5.0", un modello che integra i principi della digitalizzazione, dell'automazione e della sostenibilità con quelli relativi alla resilienza e una rinnovata centralità dell'operatore. La Logistica 5.0 non fa esclusivamente riferimento ad automazione e tracciabilità, ma anche ad aspetti di resilienza, adattabilità e attenzione alle competenze delle persone. In un contesto segnato da instabilità, la capacità di adattarsi a scenari imprevisti diventa un elemento cruciale di vantaggio competitivo. Allo stesso tempo, il ruolo umano resta imprescindibile, sia nella gestione delle tecnologie emergenti sia nella presa di decisioni complesse, spesso influenzate da trade-off tra performance economiche, ambientali e sociali.

In sintesi, il settore della logistica sta attualmente attraversando una trasformazione profonda. Per affrontare con successo le sfide attuali, è necessario comprendere quali sono i principali trend che stanno influenzando il panorama logistico e le linee di azione da intraprendere. Questo documento si pone l'obiettivo di offrire un contributo in tale direzione, fornendo un quadro strutturato delle principali tendenze che stanno rimodellando il settore della logistica.

## 2. Principali trend nel settore della logistica

### 2.1. Digitalizzazione e automazione

La trasformazione digitale rappresenta uno dei pilastri fondamentali della logistica del futuro, abilitando nuovi modelli di gestione dei flussi fisici e informativi lungo l'intera rete logistica. La digitalizzazione non si limita all'introduzione di nuove tecnologie, ma implica un cambiamento strutturale nei processi, dei modelli organizzativi e delle competenze. In questo senso, il recente paradigma della Logistica 4.0 ingloba i concetti di digitalizzazione, automazione, interconnessione e analisi dei dati, con l'obiettivo di rendere le operazioni logistiche più efficienti, flessibili e sostenibili lungo l'intera rete logistica. Alla base del paradigma stanno le tecnologie 4.0. La loro progressiva adozione ha profondamente trasformato le attività di magazzino e trasporto, consentendo una gestione sempre più integrata. Le tecnologie 4.0 sono variegata e di difficile categorizzazione data la loro natura



interconnessa e trasversale. Tuttavia, la letteratura scientifica consente di identificare le principali categorie di tecnologie digitali che possono essere impiegate a supporto dei processi logistici, fra cui: sistemi cyber-fisici (CPS), Big Data Analytics, intelligenza artificiale (AI), blockchain, cloud computing, 5G, robot collaborativi, veicoli a guida autonoma, sensoristica intelligente, realtà virtuale e aumentata, esoscheletri, identificazione automatica (Tabella 3).

<b>Tecnologie</b>	<b>Descrizione</b>
5G	La quinta generazione di reti wireless promette di essere un fattore chiave per le fabbriche intelligenti. Le caratteristiche principali sono una maggiore velocità, un'eccellente capacità di funzionare con un numero elevato di sensori e un'elevata affidabilità della connessione remota.
Cyber-Physical System (e.g., Internet of Things, Digital Twin)	Sistemi complessi e interdisciplinari che integrano calcolo, comunicazione e controllo dei processi fisici. Questi sistemi integrano processi computazionali con quelli fisici, che sono monitorati e controllati da computer e reti integrati. Ad esempio, l'Internet delle cose si riferisce a dispositivi connessi che comunicano con Internet. Una rete aperta e completa di oggetti intelligenti che hanno la capacità di auto-organizzarsi, condividere informazioni, dati e risorse, reagendo e agendo di fronte a situazioni e cambiamenti nell'ambiente.
Collaborative Robots	Robot che aiutano gli operatori a svolgere attività manuali e consentono un'interazione sicura tra gli esseri umani con l'obiettivo di migliorare le prestazioni dei sistemi di produzione/logistici e le condizioni di lavoro degli operatori.
Autonomous Vehicles (e.g., AGV, drones)	Fornire funzionalità automatizzate di carico, trasporto e scarico merci.
RFID/beacon tags and Identification	Identificazione automatica degli oggetti, mediante la memorizzazione dei dati su tag e il recupero remoto di tali dati tramite onde radio utilizzando transponder RFID all'interno di aziende, reti logistiche internazionali.
Artificial Intelligence	Algoritmi di apprendimento che migliorano sulla base dei dati e delle attività passati. La capacità di un sistema di interpretare correttamente i dati esterni, di apprendere da tali dati e di utilizzare tali conoscenze per raggiungere obiettivi e svolgere compiti specifici attraverso un adattamento flessibile.
Blockchain	Dataset che registrano le transazioni in un ambiente vulnerabile e sono protetti dalla crittografia. Un insieme finito di transazioni viene inserito in ogni blocco, che è protetto da firme digitali e funzioni di hash crittografico.
Cloud Computing	Capacità di elaborazione e archiviazione virtuali fornite tramite Internet. Utilizza connessioni Internet veloci e ad alta larghezza di banda per implementare servizi gestiti centralmente, spesso da terze parti, riducendo così al minimo i costi e le difficoltà di amministrazione e supporto IT per le organizzazioni che utilizzano tali servizi.
Big Data Analytics	Strumenti di apprendimento automatico per identificare modelli in grandi quantità di dati strutturati e non strutturati. I set di dati e le tecniche analitiche nelle applicazioni sono così grandi e complessi da richiedere tecnologie avanzate e uniche per l'archiviazione, la gestione, l'analisi e la visualizzazione dei dati.
Augmented and Virtual Reality (Cognitive Assistance)	Contenuti che si combinano con l'ambiente reale per sviluppare un ambiente reale aumentato in cui le persone possono vivere un'esperienza aumentata. La realtà virtuale, invece, è una tecnologia informatica avanzata in grado di fornire agli utenti molteplici sensazioni intuitive simulando meccanismi in un mondo fisico o immaginario.
Exoskeletons (Physical Assistance)	Possono essere classificati come passivi o attivi. I primi generano forze/coppie in risposta alla deformazione, utilizzando meccanismi non alimentati, tra cui molle o elementi simili a molle. I dispositivi attivi, al contrario, prevedono elementi alimentati che generano forza/coppia (ad esempio motori) per amplificare la forza dell'operatore.

Sensors

Dispositivi in grado di auto-organizzarsi, apprendere e conservare informazioni ambientali per analizzare comportamenti e abilità.

**Tabella 3.** Principali categorie di tecnologie 4.0 per le applicazioni nel settore della logistica.  
Fonte: Perotti et al. (2024).

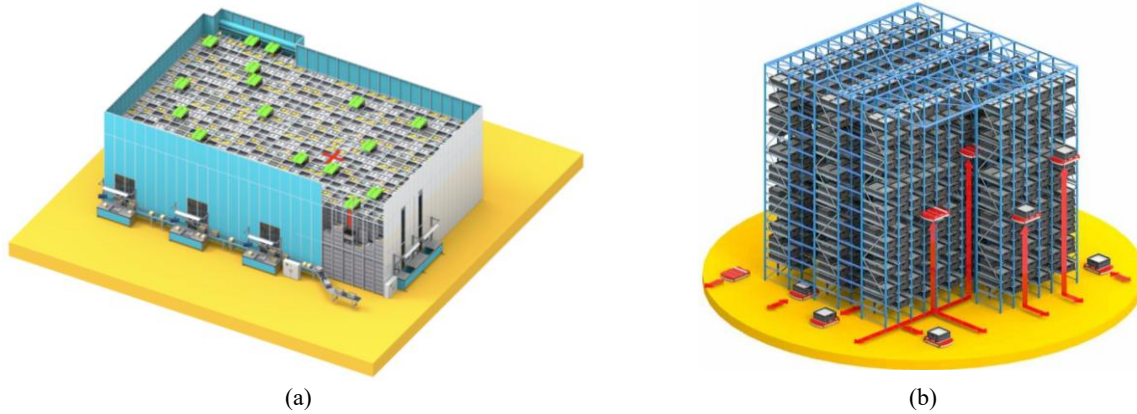
### 2.1.1. Magazzini automatici

L'insieme di queste tecnologie costituisce la base del paradigma della Logistica 4.0, in cui le informazioni viaggiano in tempo reale tra prodotti, macchine, operatori e sistemi di controllo, favorendo processi decisionali decentralizzati e adattivi. In questa prospettiva, la digitalizzazione diventa una leva strategica per raggiungere elevati livelli di performance economici, sociali e ambientali. L'utilizzo di sensori e piattaforme IoT consente di monitorare in tempo reale consumi energetici, prestazioni operative ed emissioni, migliorando la capacità di pianificare in modo proattivo le operazioni e ridurre gli sprechi. I sistemi di analisi avanzata dei dati e di intelligenza artificiale permettono di prevedere la domanda, ottimizzare la gestione delle scorte e sincronizzare i flussi di magazzino con quelli di trasporto, riducendo i viaggi a vuoto e migliorando la saturazione dei mezzi. Inoltre, la tracciabilità garantita da tecnologie come blockchain aumenta la trasparenza lungo l'intera rete logistica e consente di verificare la provenienza dei materiali e l'impatto ambientale dei processi, favorendo una maggiore affidabilità verso clienti e istituzioni. La digitalizzazione, tuttavia, non permette automaticamente di raggiungere elevati livelli di sostenibilità: la sua efficacia dipende dalla capacità delle imprese di integrare le tecnologie nei processi operativi, definendo nuovi strumenti di valutazione ed indicatori in grado di quantificare contestualmente le performance economiche, ambientali e sociali.

Di pari passo alla digitalizzazione, l'automazione rappresenta l'altro asse portante della logistica 4.0. Le innovazioni tecnologiche nei contesti di intralogistica stanno ridefinendo il concetto stesso di magazzino, che dà spazio "tradizionale" di stoccaggio, prelievo e movimentazione si evolve a sistema intelligente e adattivo, capace di gestire in modo flessibile la crescente complessità legata a diversi fattori esterni come l'e-commerce, l'omnicanalità e l'elevata volatilità della domanda. L'evoluzione dei sistemi di automazione si articola attraverso un'ampia gamma di soluzioni tecnologiche e segue una traiettoria che va dalla meccanizzazione tradizionale ai sistemi autonomi intelligenti, passando per una progressiva integrazione digitale.

La prima forma di automazione è quella meccanica, storicamente legata all'introduzione di impianti fissi e linee automatizzate per le operazioni di movimentazione e stoccaggio. Essa include nuovi sistemi per lo stoccaggio e il prelievo, come i sistemi basati su shuttle e robot (es. robotic compact storage systems – RCSS, e skypod) che si affiancano ai più tradizionali sistemi automatizzati di stoccaggio e prelievo quali trasloelevatori (Automated Storage and Retrieval Systems - AS/RS), miniload, armadi verticali automatici e caroselli. Ad esempio, i sistemi RCSS operano utilizzando colonne di contenitori, i quali vengono prelevati o inseriti da robot che si muovono lungo la superficie della griglia (struttura in alluminio) superiore o inferiore. Tale sistema assicura un'elevata densità di stoccaggio poiché elimina la necessità di corridoi (fino a  $5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ) mantenendo al contempo una elevata produttività (fino a 250 unità di carico/h) (Da Costa Barros & Nascimento, 2021; Zou et al., 2018). Un altro esempio di nuovi sistemi automatizzati di stoccaggio e prelievo basati su robot è il sistema skypod. Tale

soluzione utilizza robot autonomi per gestire le operazioni di magazzino in modo altamente efficiente. I robot si muovono autonomamente attraverso il magazzino sia in verticale che in orizzontale sfruttando guide installate sulle scaffalature. Tale caratteristica dei robot (elevata velocità di movimentazione) permette di assicurare una elevata efficienza produttiva (fino a 500 unità di carico/h) mantenendo al contempo una buona densità di stoccaggio (fino a 4 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>). Alcuni esempi di soluzioni sono riportati in Figura 2.



**Figura 2.** (a) Robotic Compact Storage System; (b) Skypod. Fonte: Dossier logistica, Osservatorio sull’Automazione dei Magazzini (2024).

Anche la movimentazione si arricchisce di nuove e più avanzate tecnologie andando a costituire la seconda forma di automazione: la robotica. Tale forma di automazione contribuisce alla transizione verso l’intralogistica intelligente, i cui protagonisti principali sono gli AMR (Autonomous Mobile Robots) che, caratterizzati da un sistema di “navigazione naturale”, sono in grado di effettuare movimentazioni all’interno di un ambiente di magazzino evitando ostacoli e ripianificando in modalità dinamica i propri percorsi, adattandosi ai flussi di lavoro e riducendo i tempi di percorrenza (Figura 3). Anche i robot antropomorfi e cartesiani impiegati ad esempio nel picking e nel confezionamento stanno evolvendo verso modelli più compatti e flessibili, capaci di gestire un’ampia varietà di articoli. L’integrazione dell’intelligenza artificiale e di algoritmi di machine learning consente a questi sistemi di apprendere dall’esperienza, migliorando progressivamente precisione e accuratezza. Queste soluzioni offrono elevati livelli di produttività e precisione, e al tempo stesso un’elevata flessibilità e scalabilità, caratteristiche necessarie per l’attuale contesto evolutivo del settore logistico. In ottica sostenibile, le nuove generazioni di sistemi automatizzati stanno integrando sensori intelligenti e moduli di recupero energetico, riducendo i consumi e migliorando le prestazioni ambientali.

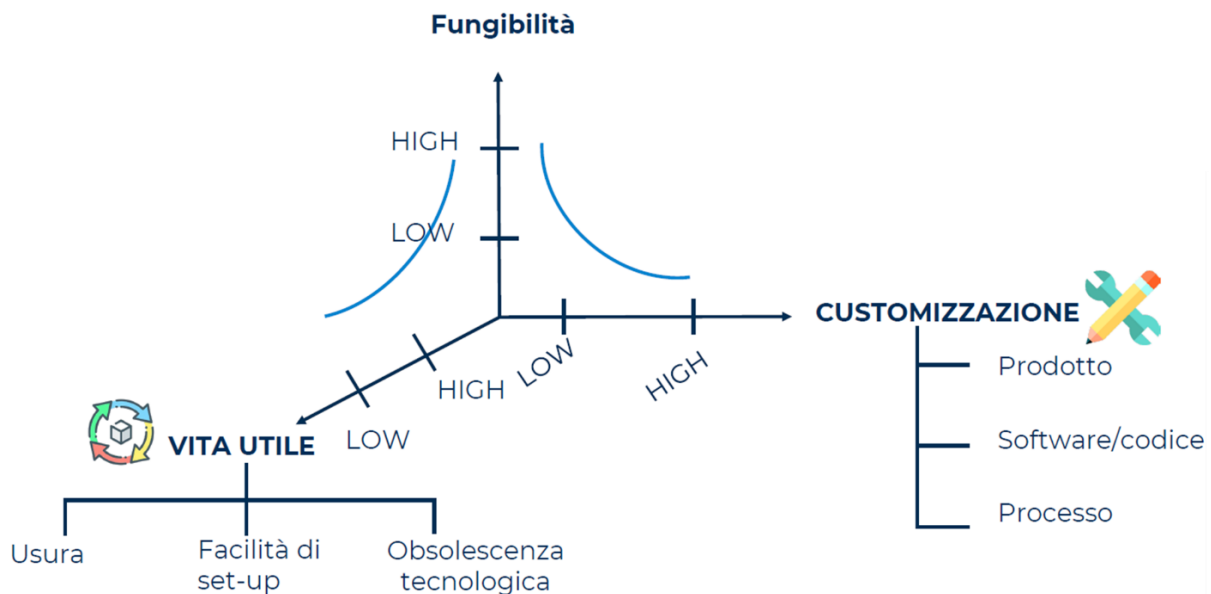


**Figura 3.** Esempio di AMR utilizzato nell’intralogistica. Fonte: Dossier logistica, La rivoluzione degli AMR (2025).

Una terza forma di automazione è rappresentata dall'automazione digitale, che combina software, sensori e capacità di calcolo per coordinare le diverse funzioni del magazzino. I sistemi basati su intelligenza artificiale gestiscono in modo dinamico l'allocazione delle risorse, il bilanciamento dei flussi e la priorità delle operazioni. In questo contesto, la digitalizzazione agisce come collante dell'automazione: collega sistemi automatizzati, persone e processi attraverso piattaforme integrate che consentono la supervisione in tempo reale e l'adattamento continuo alle condizioni operative.

Tale trasformazione delle soluzioni automatizzate nel settore della logistica ha portato anche ad una rapida diffusione della digitalizzazione che agisce da collante dell'automazione: collega sistemi automatizzati, persone e processi attraverso piattaforme integrate che consentono la supervisione in tempo reale e l'adattamento continuo alle condizioni operative, gestisce in modo dinamico l'allocazione delle risorse, il bilanciamento dei flussi e la priorità delle operazioni. Questa trasformazione ha portato ad una ridefinizione del modello economico dell'automazione. In tale contesto, il paradigma del Robot-as-a-Service (RaaS) segna una trasformazione radicale del modello di investimento in automazione rispetto al modello tradizionale. Le aziende non acquistano più direttamente l'impianto, ma ne usufruiscono tramite formule di noleggio operativo o pay-per-use, trasformando un investimento capitale in un costo operativo flessibile. Questo modello riduce le barriere economiche all'adozione, consente una rapida scalabilità e incentiva i fornitori a mantenere elevati standard di efficienza e affidabilità. Inoltre, l'uso del RaaS favorisce la diffusione di tecnologie energeticamente più efficienti, poiché i fornitori hanno un interesse diretto a garantire prestazioni elevate e ridotti costi di esercizio. Tale modello economico permette di liberare risorse finanziarie e rende l'automazione più accessibile anche alle imprese di dimensioni medio-piccole o con domanda altamente variabile. Dal punto di vista gestionale, offre maggiore flessibilità, poiché la durata dei contratti, la configurazione dei sistemi e il numero di robot impiegati possono essere adattati alle esigenze stagionali o ai cambiamenti della domanda logistica. Tuttavia, la diffusione di questo modello dipende da una serie di variabili tecniche che ne determinano la fattibilità e la convenienza. In particolare, il concetto di "fungibilità" della soluzione automatizzata emerge come elemento chiave per comprendere quali tecnologie siano più idonee a essere erogate tramite il modello di RaaS. La fungibilità è definita come la capacità di un determinato sistema o tecnologia di essere riutilizzato da diversi clienti nel corso della propria vita utile, senza richiedere interventi significativi di riconfigurazione o adattamento. Essa è quindi funzione di due variabili principali: la vita utile del bene e il grado di customizzazione della soluzione. Come mostrato in Figura 4, al diminuire della customizzazione della soluzione e all'allungarsi della sua vita utile, il bene risulta essere più fungibile e quindi adatto ad essere fornito tramite noleggio operativo. Quindi, quando una tecnologia presenta una lunga vita utile e un basso livello di customizzazione, essa risulta altamente fungibile e può essere impiegata in contesti differenti con limitati costi di adattamento, ideale per un modello di RaaS. È il caso, ad esempio, di flotte di AMR o AGV impiegate per la movimentazione interna, che possono essere facilmente riallocate, aggiornate tramite software e adattate a layout diversi. Queste soluzioni hanno cicli di vita lunghi e non richiedono una profonda integrazione fisica o informatica con l'infrastruttura del magazzino, garantendo così al fornitore una maggiore possibilità di riutilizzo e ammortamento della soluzione su più clienti. Al contrario, le tecnologie ad alta customizzazione e con vita utile

più breve, come i sistemi automatizzati di stoccaggio, presentano una fungibilità molto bassa. In questi casi, l'impianto è progettato su misura per un determinato contesto operativo e difficilmente può essere riconfigurato o spostato altrove. Di conseguenza, tali soluzioni si prestano meno al modello di noleggio operativo e rimangono tipicamente soggette a investimenti diretti da parte del cliente finale.



**Figura 4.** Livello di fungibilità delle soluzioni automatizzate al variare della vita utile e customizzazione. Fonte: Osservatorio Contract Logistics Gino Marchet, Politecnico di Milano (2024).

### 2.1.2. Innovazione tecnologica nei terminal multimodali

Come i magazzini, anche i terminal multimodali stanno vivendo un rapido processo di trasformazione grazie all'adozione di tecnologie avanzate che migliorano l'efficienza operativa, la sicurezza e la sostenibilità. Le principali tecnologie vettori di questo cambiamento sono: Internet of Things (IoT), Intelligenza Artificiale (AI), Digital Twin (DT), Cloud Computing e Big Data Analytics, che ormai non possono più essere trattate singolarmente, poiché la maggior parte delle soluzioni tecnologiche implica l'utilizzo contestuale di più di una di queste, se non tutte. Per questo motivo, la struttura di questo capitolo non segue un'analisi delle singole tecnologie, ma è organizzata in base ai loro campi di applicazione e all'impatto concreto sui terminal multimodali. L'obiettivo è offrire, nei sottoparagrafi seguenti, una panoramica di come queste tecnologie interagiscono tra loro e supportano l'ottimizzazione dei processi con strumenti di monitoraggio, la gestione del terminal, l'automazione e la manutenzione, fino alla digitalizzazione del materiale rotabile e delle operazioni ferroviarie.

#### Monitoraggio delle operazioni all'interno dei terminal

Una tecnologia sempre più diffusa all'interno dei terminal multimodali è la *computer vision* (CV), o visione artificiale: un ramo dell'AI che permette ai sistemi informatici di estrarre informazioni significative da immagini, video e altri input visivi, generando azioni o segnalazioni

sulla base di tali dati. Il suo impiego è evidente già all'ingresso dei terminal grazie ai portali OCR (*optical character recognition*), che riconoscono automaticamente i codici identificativi delle unità di carico intermodali (container, casse mobili e semirimorchi). Ciò consente processi di controllo più rapidi e sicuri, e una riduzione della congestione.

I portali OCR risultano più efficienti rispetto ai varchi RFID, sia in termini di costi sia di accuratezza. Possono essere installati come telecamere fisse in punti strategici, ma per ridurre la necessità di infrastrutture dedicate si stanno diffondendo soluzioni più flessibili basate su veicoli terrestri o droni dotati di telecamere, oltre a dispositivi mobili (Gülsoylu et al., 2025).

Questa tecnologia è già utilizzata in diversi terminal europei, tra cui il Terminal Busto Arsizio–Gallarate di Hupac. In alcuni casi i portali OCR non si limitano alla lettura dei dati alfanumerici: al Terminal EWG in Ungheria, ad esempio, essi rilevano anche eventuali danni ai container (EWG, 2025)

La CV è impiegata anche nelle operazioni di movimentazione, per esempio con reach stacker nei terminal automatizzati. Qui la visione artificiale permette di rilevare oggetti (container, veicoli, macchinari) e stimarne le distanze con elevata precisione, contribuendo alla sicurezza e garantendo operazioni di sollevamento più accurate (Cuong et al., 2024).

Infine, grazie ai modelli di deep learning, la CV migliora la sicurezza individuando anomalie come personale non autorizzato, carichi sospetti o malfunzionamenti delle attrezzature, ad esempio un gancio di gru disallineato. Automatizzando queste attività, la CV riduce gli errori umani e accelera i flussi operativi, creando una base solida per l'integrazione con ulteriori tecnologie (Sirohi et al., 2025).

## **Gestione del terminal**

L'ottimizzazione dei processi nei terminal multimodali si fonda sulla tecnologia IoT, che consente di raccogliere dati in tempo reale sull'intero ecosistema operativo. Sensori installati su gru, camion e container monitorano lo stato delle attrezzature, le condizioni del carico e i fattori ambientali, mentre nei container IoT è possibile rilevare umidità, temperatura, luminosità e vibrazioni durante il trasporto (Sirohi et al., 2025).

L'IoT fornisce anche informazioni precise sulla posizione dei container all'interno degli stack, migliorando la pianificazione, riducendo i movimenti inutili delle gru e abbassando i tempi operativi. Un vantaggio chiave è la scalabilità: i sensori possono essere installati gradualmente, iniziando dagli asset critici e ampliando la rete nel tempo. La possibilità di espandere progressivamente le reti IoT permette ai terminal di iniziare con investimenti contenuti e di ottenere, con l'aumentare dei sensori installati nel tempo, livelli via via più approfonditi di insight operativi (Sirohi et al., 2025)

Integrando IoT e machine learning (ML), è possibile prevedere scenari operativi e ottimizzare i processi. Gli algoritmi ML suggeriscono configurazioni di stacking più efficienti, riducendo il numero di movimenti necessari per recuperare i container. Un'altra applicazione fondamentale è la previsione della domanda: analizzando i volumi storici, le tendenze del commercio globale e i dati di spedizione in tempo reale, i modelli ML prevedono i picchi di

traffico, permettendo una migliore allocazione delle risorse e un'ottimizzazione dei costi (Sirohi et al., 2025).

Queste tecnologie trovano applicazione anche oltre i confini del terminal. Un esempio significativo è il progetto tedesco KIBA (concluso nel 2025), volto a migliorare l'efficienza, la sicurezza e la sostenibilità del trasporto ferroviario delle merci tramite AI e ottimizzazione matematica. Il progetto ha sviluppato metodi per l'ottimizzazione della rete e la pianificazione del carico, visualizzati tramite un'interfaccia web dedicata. I modelli assicurano un uso ottimale dei treni in termini di peso e lunghezza, riducendo movimenti di gru e ricollocamenti, con tempi di trasporto più rapidi e meno trasbordi (KIBA, 2025).

Ulteriori benefici derivano dall'uso di *Digital Twin*: un modello virtuale che replica fedelmente il sistema fisico. I DT permettono di simulare scenari operativi e supportano decisioni più informate e tempestive. Nel contesto di un terminal, disporre di un modello virtuale che riproduce fedelmente lo stato di esso consente ai gestori di prevedere e mitigare potenziali interruzioni, migliorando l'efficienza complessiva della logistica multimodale (Thompson et al., 2025).

Riducendo congestione e ottimizzando l'utilizzo dei macchinari, tutte queste tecnologie contribuiscono anche a contenere l'impatto ambientale delle operazioni.

## **Automazione**

L'automazione nei terminal multimodali si basa sulla combinazione di tecnologie avanzate come Digital Twin, IoT e AI, e coinvolge sia la movimentazione orizzontale sia quella verticale.

Nella movimentazione orizzontale - il trasferimento dei container tra diverse aree del terminal - l'automazione è particolarmente avanzata. Per ridurre i tempi di attesa e la congestione, è fondamentale allocare in modo efficiente i veicoli a guida autonoma (AGV) e le straddle carrier. A tal fine, la ricerca sta sviluppando strategie di allocazione dinamica basate su fattori come posizione dei container, priorità e distanze di percorrenza (Neugebauer et al., 2024).

Nella movimentazione verticale, le tradizionali gru di piazzale si sono evolute in Automated Stacking Cranes (ASC). Le ASC e piazzali automatizzati rappresentano una delle aree di ricerca più attive legate ai Digital Twin: questi modelli possono monitorare e controllare le gru, fornendo insight sulle operazioni e permettendo di testare algoritmi di controllo senza interrompere le attività fisiche (Neugebauer et al., 2024).

La connettività 5G è un elemento abilitante essenziale, poiché garantisce velocità e stabilità nella trasmissione dei dati e consente il controllo remoto delle gru e dei veicoli. Il corretto posizionamento delle antenne è cruciale per garantire le prestazioni richieste all'automazione e ai Digital Twin.

## **Manutenzione**

Le strategie avanzate di manutenzione dell'infrastruttura e del materiale rotabile possono essere suddivise in due categorie principali: manutenzione predittiva (PM) e manutenzione

basata sulle condizioni (CBM). La CBM interviene in base allo stato reale dell'asset, mentre la PM utilizza analisi avanzate per prevedere il momento ottimale dell'intervento.

La manutenzione predittiva utilizza AI per analizzare i dati provenienti da sensori e dispositivi, prevedendo quando un guasto potrebbe verificarsi o quando è necessario un intervento. Si distingue dalla manutenzione preventiva, che si basa su intervalli fissi di tempo o chilometraggio (Sarp et al., 2024).

La CBM monitora in tempo reale le condizioni operative dei treni e delle infrastrutture, attivando la manutenzione quando un parametro scende sotto una soglia definita. Il Digital Twin e l'IoT forniscono la capacità di tracciamento continuo che sostituisce le ispezioni fisiche programmate (Sarp et al., 2024).

Grazie alla combinazione di IoT, AI e Digital Twin, queste strategie permettono interventi tempestivi, portando alla riduzione significativa dei costi, maggiore sicurezza e prolungamento della vita degli asset.

### **2.1.3. Focus: materiale rotabile**

I terminal multimodali, pur essendo soggetti a rapidi avanzamenti tecnologici, devono tener conto anche della realtà del materiale rotabile che vi opera, il quale risulta generalmente più restio ai cambiamenti. Uno dei motivi principali è che i treni – molto più di altri mezzi di trasporto – vengono progettati e costruiti per rimanere in servizio per diversi decenni. Questa visione duratura sembra di essere il completo opposto di ciò che accade nei terminal, eppure anche qua si riscontra una chiara tendenza alla digitalizzazione e automazione e, infine, verso Logistica 5.0. Ciò accade, però, non tanto attraverso l'introduzione delle tecnologie radicalmente nuove, ma piuttosto tramite la trasformazione dei sistemi esistenti in reti più adattabili, sostenibili e resilienti. (Sarp et al., 2024)

#### **Internet of Trains**

Coniato da Siemens nel 2017, il termine "Internet of trains" si riferisce all'uso di dispositivi IoT applicati al settore ferroviario: sensori installati sui treni o lungo la linea forniscono dati per molteplici applicazioni. Questi includono monitoraggio della flotta (velocità, posizione, consumo di carburante, stato delle batterie) e dati sullo stato del treno, particolarmente importanti per i sistemi Maglev (Singh et al., 2022).

I treni Maglev, sebbene oggi usati quasi esclusivamente per passeggeri, sono stati studiati anche per il trasporto merci. Il progetto europeo MaDe4Rail (coordinato da RFI e concluso nel 2024) ha valutato la fattibilità tecnica ed economica dei sistemi Maglev in ambito merci, sviluppando una roadmap per una possibile futura implementazione e progettando un prototipo per un caso d'uso europeo (RFI, 2024).

#### **Manovra ferroviaria**

Il livello di automazione nelle operazioni di manovra varia significativamente tra terminal. Molti stanno introducendo applicazioni di pianificazione della manovra integrate con i sistemi



ferroviari e di terminal, mentre altri stanno sperimentando locomotive di manovra automatizzate.

Molte soluzioni legate a quest'ultime sono ancora in fase di prototipo o test. Un esempio è il progetto di DB Cargo, in collaborazione con Bosch Engineering e ITK Engineering, per sviluppare una locomotiva di manovra completamente automatizzata. Le attività oggi svolte da locomotive guidate manualmente (separazione, riordinamento e ricomposizione dei carri) verrebbero eseguite in modo autonomo. Bosch Engineering sta sviluppando sensori e algoritmi di percezione dell'ambiente, mentre ITK Engineering sta progettando un'interfaccia operatore per impartire comandi e monitorare i movimenti. Un prototipo è stato testato allo scalo di Monaco Nord. DB Cargo punta all'autorizzazione entro il 2027, con avvio operativo nel 2028 (Railmarket, 2025).

## **2.2 Sostenibilità ed efficienza energetica**

Nell'ultimo decennio le aziende hanno acquisito una progressiva e crescente consapevolezza della rilevanza di considerare, accanto alla performance economica e all'efficacia del servizio, anche le ricadute che il proprio business ha in termini di consumo di risorse e conseguente impatto ambientale. La sostenibilità sta acquisendo un'importanza sempre maggiore a causa dell'urgenza di intraprendere azioni complete per affrontare le sfide poste dal cambiamento climatico a livello individuale, nazionale e internazionale. In questo contesto, le aziende sono sottoposte a una costante pressione da parte di vari stakeholder – clienti, competitor, istituzioni, società – affinché adottino pratiche sostenibili per ridurre il loro impatto ambientale.

L'Accordo di Parigi, firmato durante la Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici del 2015, è stato un punto di svolta cruciale. Ha dimostrato l'impegno globale per affrontare il riscaldamento globale e ha segnato un riconoscimento internazionale dei suoi impatti significativi. Nel 2019, l'Unione Europea (UE) ha deciso di agire con determinazione per raggiungere la neutralità climatica entro il 2050, seguendo gli obiettivi dell'Accordo di Parigi. Questo impegno si è tradotto nello sviluppo del "European Green Deal", un insieme completo di iniziative strategiche riguardanti la neutralità climatica, la transizione energetica, la protezione dell'ambiente, l'agricoltura sostenibile, l'economia verde, i trasporti ecocompatibili e la finanza sostenibile. L'obiettivo finale è promuovere un percorso sostenibile e raggiungibile verso la transizione verde per tutti i membri dell'UE. Per raggiungere l'obiettivo a lungo termine della neutralità climatica entro il 2050, la Commissione Europea ha stabilito obiettivi climatici a breve termine da raggiungere entro il 2030, tra cui l'ambizioso traguardo di ridurre le emissioni nette di gas serra di almeno il 55% rispetto ai livelli del 1990 (International Energy Agency, 2023).

In tale contesto, ricoprono un ruolo fondamentale gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (Sustainable Development Goals – SDGs) definiti dalle Nazioni Unite nel 2015 come parte dell'Agenda 2030. I 17 SDGs rappresentano una visione globale e integrata dello sviluppo, che tiene conto simultaneamente della crescita economica, della tutela ambientale e dell'inclusione sociale. Obiettivi quali la lotta contro il cambiamento climatico (SDG 13), la promozione di industrie, innovazione e infrastrutture sostenibili (SDG 9), il consumo e la produzione responsabili (SDG 12), e le città e comunità sostenibili (SDG 11), sono strettamente

connessi al sistema logistico e sottolineano il ruolo cruciale della logistica per una corretta transizione sostenibile. La logistica, infatti, è un catalizzatore chiave per il raggiungimento degli SDGs. Le scelte in materia di trasporto, packaging, gestione dei magazzini e ottimizzazione delle rotte hanno un impatto diretto sulla riduzione delle emissioni e sull'efficienza energetica complessiva della rete. Pertanto, l'allineamento delle strategie logistiche con gli SDGs non rappresenta più una semplice opzione etica o reputazionale, bensì un requisito fondamentale per garantire la sostenibilità e la competitività delle imprese nel lungo termine. Per tale motivo, negli ultimi anni, da un lato è aumentata l'esigenza di misurare correttamente le prestazioni ambientali delle attività logistiche, individuando le metodologie più idonee e i corrispondenti KPI, dall'altro è cresciuta l'attenzione verso la corretta individuazione di pratiche di green logistics allo scopo di ridurre l'impatto ambientale di tutte le operazioni logistiche.

### 2.2.1. Strategie di sostenibilità e metodologie di assessment

L'implementazione del concetto di green logistics richiede strategie a medio e lungo termine, che necessitano come base di partenza la valutazione e la misurazione delle emissioni per identificare eventuali opportunità di miglioramento e monitorare l'efficacia delle iniziative implementate. Inoltre, con la recente direttiva emanata dal Parlamento Europeo (Corporate Sustainability Reporting Directive, CSRD, 2022), viene ribadita l'importanza della comunicazione da parte delle aziende del loro impegno nei confronti della sostenibilità attraverso la stesura di report di sostenibilità ambientale (Company Sustainability Report – CSR), spingendole ad impegnarsi nei confronti delle politiche ambientali nazionali ed europee. L'introduzione di una direttiva in materia di sustainability reporting evidenzia l'importanza per le aziende di misurare le proprie prestazioni ambientali, incluse quelle legate ai processi logistici. La misurazione dell'impatto ambientale rappresenta infatti il primo passo cruciale per il raggiungimento degli SDGs e per facilitare la transizione ambientale. In assenza di dati affidabili e strutturati, risulta altamente difficile stabilire target realistici, valutare l'efficacia delle azioni intraprese o confrontarsi con benchmark di settore. Nel settore della logistica, diversi Key Performance Indicators (KPI) sono stati introdotti e sono ad oggi spesso utilizzati per la misurazione ambientale, i cui principali sono riportati di seguito (ISPRA, 2025; GLEC Framework, 2024; ISO 14083, 2023):

- Emissioni di gas a effetto serra (GHG): espresse in termini di tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e)
- Emission intensity factor: misurato in termini di kg CO<sub>2</sub>e per tonnellata-chilometro (kgCO<sub>2</sub>e/ton · km)
- Emission intensity factor (per immobili logistici): misurato in termini di kg CO<sub>2</sub>e per metro quadro (kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>)
- Consumo energetico: misurato in termini di kWh/anno
- Energy Use Index (EUI): misurato in termini di kWh/km
- Energy Use Index (EUI – per immobili logistici): misurato in termini di kWh/m<sup>2</sup>

Tuttavia, nonostante la crescente disponibilità di strumenti utili per la misurazione (e.g., sensoristica real-time, modelli di supporto decisionale, software per la quantificazione della

CO<sub>2</sub>e generata), le imprese tuttora abbracciano approcci spesso non uniformi e incontrano difficoltà nell'identificare metodologie di valutazione ambientale coerenti e standardizzate. Le principali motivazioni legate a tali difficoltà derivano da:

- Scarsa consapevolezza degli standard e linee guida disponibili a livello internazionale ed europeo per la misurazione dell'impatto ambientale: ogni linea guida si concentra su una o più parti del processo logistico utilizzando approcci diversi, motivo per cui è essenziale scegliere la linea guida che meglio si adatta agli obiettivi di valutazione ambientale
- Difficoltà sia a identificare i dati da raccogliere sul campo per la quantificazione dell'impatto ambientale dei processi logistici, sia ad individuare i fattori emissivi di impatto ambientale per la conversione delle attività logistiche in kg CO<sub>2</sub>e generata
- Mancanza di un sistema globale condiviso per il reporting delle emissioni: un sistema globale di misurazione e rendicontazione ambientale è ancora assente, ciò obbliga le imprese a fare riferimento alle diverse direttive nazionali, in base al Paese in cui si opera. Questo comporta un elevato grado di difficoltà gestionale e burocratica per le multinazionali che operano su più territori.

Al fine di comprendere al meglio gli aspetti legati alla misurazione dell'impatto ambientale, è fondamentale distinguere i riferimenti ad oggi disponibili per le aziende, fra cui standard e linee guida. Gli standard sono documenti sviluppati e approvati da enti di normazione riconosciuti (e.g., ISO o EN), che forniscono requisiti precisi e verificabili per la misurazione e la rendicontazione di determinati aspetti ambientali. Pur essendone l'adozione spesso su base volontaria, gli standard sono spesso richiesti per ottenere certificazioni accreditate (e.g., LEED, BREEAM). Le linee guida (o framework), al contrario, sono strumenti di orientamento; forniscono raccomandazioni operative, principi metodologici e buone pratiche, ma non impongono requisiti stringenti né sono generalmente oggetto di certificazione. Per tale motivo, sono utili per orientare le aziende, in particolare quelle che si avvicinano per la prima volta alla misurazione e rendicontazione ambientale. Tuttavia, non garantiscono la stessa uniformità e rigore delle misurazioni offerte dagli standard.

Al fine di fornire una panoramica completa relativa agli attuali strumenti disponibili a supporto della misurazione delle emissioni ambientali, di seguito viene riportato un elenco dettagliato dei diversi standard e linee guida:

### **Standard**

- **EN 16258:** Introdotta nel 2012, tale standard è uno dei riferimenti europei più importanti. Esso definisce una metodologia per il calcolo delle emissioni di gas serra e del consumo energetico associati ai servizi di trasporto, sia merci che passeggeri. È caratterizzato da un'elevato dettaglio tecnico, soprattutto nella distinzione tra emissioni dirette (Tank-to-Wheel, TTW) e indirette (Well-to-Tank, WTT), con la possibilità di ottenere un bilancio completo (Well-to-Wheel, WTW). Tuttavia, uno dei limiti principali di questo standard è che non considera le emissioni legate alle attività operative degli insediamenti ad uso logistico, come quelle nei magazzini.

Inoltre, il suo campo di applicazione è limitato al contesto europeo. Tale aspetto potrebbe però risultare un punto di forza per le aziende che operano all'interno del territorio europeo, siccome fornisce parametri per l'impatto ambientale specifici per ciascuna nazione del contesto europeo (country-specific parameters).

- **Serie ISO 14000:** Tale serie di standard è uno degli strumenti più utilizzati in ambito internazionale, in particolare lo standard ISO 14064-1, che fornisce un quadro per la quantificazione e il reporting delle emissioni di gas serra a livello organizzativo. Questo standard non è specifico per la logistica, ma è altamente riconosciuto a livello globale per la sua flessibilità nella definizione dei confini operativi e organizzativi, permettendo alle aziende di rendicontare le emissioni dirette e indirette (e.g., Scope 1, Scope 2, Scope 3). Tuttavia, tale serie di standard non prevede una metodologia dettagliata per il calcolo delle emissioni, che deve essere scelta dall'organizzazione in base a criteri di accuratezza e fattibilità. Infine, nel 2023 è stato pubblicato lo standard ISO 14083, sviluppato appositamente per la quantificazione delle emissioni legate sia ai trasporti che agli insediamenti ad uso logistico, differenziate in base alla tipologia di attività logistica svolta al suo interno (e.g., cross-docking, nodo intermodale, magazzino) e alla temperatura operativa all'interno dell'edificio stesso (e.g., temperatura ambiente, multi-temperatura, refrigerato, raffrescato). È destinato a diventare il riferimento globale per la misurazione delle emissioni nella supply chain, superando i limiti dell'EN 16258 e introducendo maggiore coerenza metodologica.
- **GRI (Global Reporting Initiative) 302 & 305:** La serie di standard GRI fornisce uno strumento molto diffuso e riconosciuto per il reporting di sostenibilità ambientale. Anche se non si tratta di standard tecnici per il calcolo delle emissioni, il loro punto di forza risiede nella strutturazione del report secondo indicatori ambientali, sociali ed economici. Sono largamente utilizzati per comunicare in modo trasparente le performance ambientali agli stakeholder, anche se non prevedono una certificazione formale né metodi di calcolo precisi.

### **Linee guida**

- **GHG Protocol:** Sviluppato dal World Resources Institute e dal World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) è tra le linee guida più riconosciute e utilizzate a livello globale. Questo framework rappresenta una delle basi teoriche e pratiche più diffuse per la misurazione delle emissioni di gas serra. Fornisce strumenti per il calcolo delle emissioni Scope 1, 2 e 3, supporta sia il livello organizzativo che quello di prodotto. Tuttavia, la sua applicazione può risultare complessa per le aziende meno strutturate e necessita spesso di adattamenti settoriali essendo di mirato per una applicazione universale.
- **IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change):** Tale linea guida costituisce il fondamento scientifico per l'elaborazione dei report nazionali delle emissioni. Anche se sono molto dettagliate e rigorose, sono pensate principalmente per le istituzioni pubbliche e risultano poco pratiche per l'uso quotidiano da parte delle imprese private.

- **GLEC Framework:** Sviluppato dallo Smart Freight Centre, è la linea guida a carattere più pratico e specifico per il settore logistico. Questo framework offre indicazioni concrete per il calcolo delle emissioni lungo tutta la supply chain, considerando tutte le modalità di trasporto (incluse quelle intermodali) e tutte le tipologie di insediamenti ad uso logistico. È ampiamente riconosciuto a livello internazionale, ed ha rappresentato una base importante di partenza per lo sviluppo della nuova ISO 14083. Tutti i parametri ambientali forniti, inclusi i database, sono stati calcolati in modo specifico per il contesto europeo basandosi sulle formule/metodologie indicate dal CLECAT Framework.
- **CLECAT Framework:** Tale linea guida è promossa principalmente dall'associazione europea del settore trasporti e logistica. Il motivo principale è che offre orientamenti utili per il contesto normativo europeo. Tuttavia, non fornisce parametri utili per il contesto ambientale (come il GLEC), ma offre un'importante struttura metodologica per il calcolo delle emissioni ambientali (e.g., vengono fornite formule e metodologie di calcolo dei vari KPI ambientali richiesti dalle normative). I parametri forniti dal GLEC Framework sono calcolati sulla base delle formule/metodologie indicate dal CLECAT Framework.
- **CDP (Carbon Disclosure Project):** Tale linea guida rappresenta una piattaforma di reporting a base volontaria, pensata per incentivare la trasparenza delle imprese nei confronti degli investitori e degli stakeholder. Anche se non fornisce un metodo di calcolo strutturato, il CDP rappresenta uno strumento utile per la rendicontazione e il posizionamento strategico in ottica sostenibile.

La Tabella 4 riporta una sintesi dei principali standard e linee guida per la misurazione e reporting dell'impatto ambientale. L'adozione di standard e linee guida per la valutazione ambientale costituisce un passaggio cruciale per le aziende che intendono integrare la sostenibilità nella propria strategia. Gli standard, come la serie ISO 14000 o EN 16258, offrono rigore metodologico e possibilità di certificazione, mentre le linee guida, come il GHG Protocol o il GLEC Framework, forniscono flessibilità e strumenti pratici per l'implementazione. La scelta dell'uno o dell'altro dipende strettamente dal contesto aziendale, dal livello di dettaglio richiesto, dagli obblighi normativi e dagli obiettivi strategici di comunicazione e trasparenza verso gli stakeholder.

	Type	First release date	Issuing body	Suitable end-users	Geographical reach	Approach	Environmental KPIs suggested	Specific focus on logistics	Database for emission factors	Environmental performance reporting	Certification audit
EN 16258	Standard	2012	CEN	Both public and private	European-specific	Quantitative	Carbon footprint [CO <sub>2</sub> e] and energy consumption [J]	Yes	Yes	None	Optional
ISO 14083	Standard	2023	ISO	Both public and private	Global-specific	Quantitative	Carbon footprint [CO <sub>2</sub> e] and energy consumption [J]	Yes	Yes	Yes	Mandatory
GRI 302–305	Standard	2016	GRI	Private only	–	Qualitative AND quantitative	Carbon footprint [CO <sub>2</sub> e] and energy consumption [J]	No	No	Yes	Optional
IPCC Guidelines	Guideline	2006	IPCC International	Mainly public	Global-specific	Qualitative AND quantitative	Carbon footprint [CO <sub>2</sub> e]	No	Yes	Yes	Optional
GHG Protocol	Guideline	2004	WBCSD and WRI	Both public and private	–	Qualitative AND quantitative	Carbon footprint [CO <sub>2</sub> e]	No	No	Yes	Optional
CLECAT framework	Guideline	2012	European	Private only	–	Qualitative AND quantitative	Carbon footprint [CO <sub>2</sub> e]	Partially	No	None	Mandatory
GLEC framework	Guideline	2019	SFC International	Both public and private	European-specific	Qualitative AND quantitative	Carbon footprint [CO <sub>2</sub> e]	Yes	Yes	Yes	Mandatory
CDP	Guideline	2000	Carbon Disclosure Project	Both public and private	Global-specific	Qualitative AND quantitative	Carbon footprint [CO <sub>2</sub> e]	Partially	Yes	Yes	Optional

**Tabella 4.** Sintesi dei principali standard e linee guida per la misurazione e reporting dell'impatto ambientale. Fonte: Barbieri et al. (2025)

## 2.2.2. Decarbonizzazione dei trasporti e multimodalità

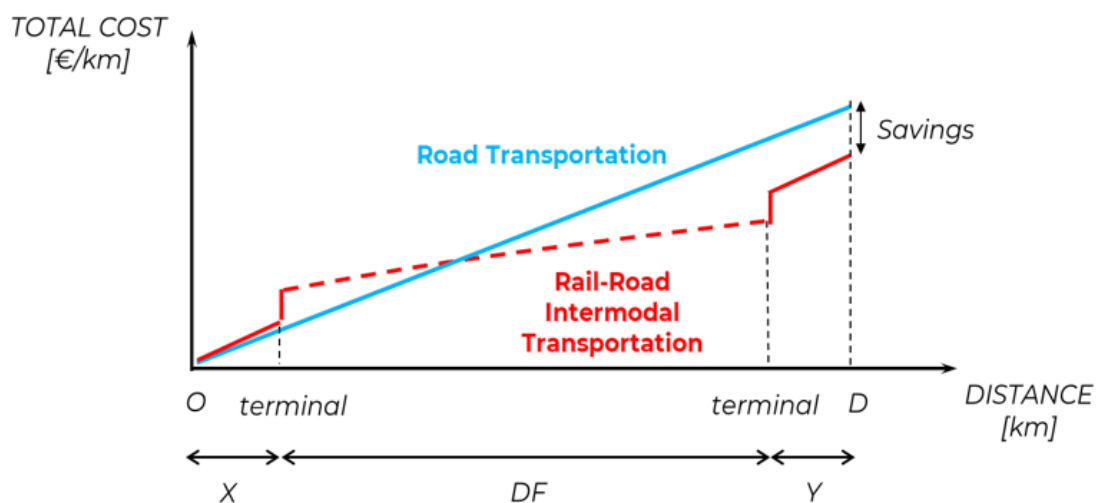
Il settore dei trasporti è responsabile di circa il 29% delle emissioni europee di gas serra, di cui oltre il 70% attribuibili al trasporto su strada (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2025). Tale comparto rappresenta una delle aree più critiche nella transizione Net-Zero da dover raggiungere entro il 2050, poiché fortemente dipendente dai combustibili fossili e caratterizzato da un'elevata frammentazione della filiera logistica. Per affrontare la sfida della decarbonizzazione della logistica è necessario un approccio sistemico che agisca su più livelli (i.e., strategico, tattico e operativo) e che integri le dimensioni tecnologiche, infrastrutturali e organizzative. In questa prospettiva, la sostenibilità dei trasporti si articola in due principali prospettive di intervento (McKinnon, 2018):

1. Azioni in ottica strategica/di lungo periodo
2. Azioni in ottica operativa/di medio-breve periodo

Da un punto di vista strategico, il primo ambito di intervento riguarda la riprogettazione dei network logistici e delle reti di trasporto in un'ottica di riduzione complessiva dell'impatto ambientale. La riprogettazione delle reti logistiche in ottica sostenibile implica una revisione dei modelli logistici tradizionali considerando l'impatto ambientale come vincolo o obiettivo da dover raggiungere. A tal fine, la riprogettazione della rete logistica deve mirare a ridurre il più possibile la distanza media percorsa e ottimizzare i flussi di trasporto (McKinnon et al., 2015). Di conseguenza, le scelte di posizionamento dei poli produttivi e logistici, la configurazione delle tratte di trasporto e la gestione dei flussi fisici lungo la rete logistica devono essere riconsiderate alla luce dei criteri di sostenibilità ambientale (McKinnon, 2018). In questa prospettiva, le imprese che mirano a ridurre l'impatto ambientale delle attività logistiche

stanno evolvendo i loro modelli di distribuzione da approcci centralizzati, basati su grandi hub distanti dai mercati di consumo, a configurazioni più decentrate (i.e., nearshoring e local sourcing) che permettono di ridurre le percorrenze medie. Inoltre, l'integrazione di tali logiche consente di accorciare le catene di approvvigionamento e ridurre le emissioni indirette legate ai trasporti internazionali, oltre che fornire una maggiore resilienza in contesti di incertezza. Infine, una ulteriore strategia riguarda il bilanciamento dei flussi tramite una migliore pianificazione della domanda e l'adozione di logiche "pull". In tale contesto il ruolo delle tecnologie digitali risulta essere cruciale (e.g., machine learning, AI, Big Data Analytics) al fine di sviluppare modelli predittivi che consentano di pianificare la domanda in modo accurato minimizzando il numero di spedizioni urgenti o fuori programma (tipicamente caratterizzate da un elevato impatto ambientale).

Sempre in ottica di azioni a livello strategico, il secondo ambito di intervento è rappresentato dalla transizione verso modalità di trasporto a minore impatto ambientale, come treno e nave. Tale approccio, spesso indicato come modal shift, si fonda sul principio di utilizzare ciascuna modalità di trasporto nel tratto in cui è più efficiente dal punto di vista ambientale, al netto dei vincoli strutturali e geografici (McKinnon et al., 2015). Esso, qualora percorribile compatibilmente con i vincoli logistici ed operativi, rappresenta una delle strategie chiave per ridurre le emissioni per tonnellata-chilometro. Per esempio, l'integrazione tra strada e ferrovia consente di coniugare la flessibilità del trasporto su gomma con l'efficienza e la sostenibilità di quello ferroviario, soprattutto nelle tratte di media-lunga distanza. Tale tipologia di trasporto intermodale comporta anche dei vantaggi economici affidabili nel tempo (vedi Figura 5) se le condizioni a contorno del sistema sono rispettate (distanza percorribile via treno superiore di cinque volte a quella percorribile via gomma), così come dimostrato da diversi studi scientifici presenti in letteratura (Banomyong & Beresford, 2001). La convenienza del trasporto gomma-ferro è alla base delle politiche europee per l'intermodalità, promosse attraverso i programmi TEN-T e CEF Transport, che mirano alla creazione di corridoi logistici verdi e alla valorizzazione dei nodi intermodali. Tali politiche internazionali evidenziano come la sostenibilità del trasporto non dipenda unicamente dall'adozione di nuove tecnologie legate ai veicoli, ma anche dalla capacità di ripensare le scelte modali in una prospettiva sistemica di lungo termine.



**Figure 5.** Modello di costo del sistema di trasporto multimodale strada-ferro-strada.  
Fonte: Banomyong & Beresford (2001)

In ottica di azioni a livello operativo/di medio-breve periodo, i diversi ambiti di intervento racchiudono l'insieme delle innovazioni tecnologiche, gestionali e operative finalizzate alla riduzione diretta delle emissioni derivanti dal trasporto. Tale macroarea di intervento rappresenta la dimensione più dinamica e trasversale della transizione, poiché coinvolge contemporaneamente la tipologia di veicoli utilizzati, le infrastrutture energetiche/logistiche e l'organizzazione dei processi logistici. Nello specifico, si possono individuare quattro diverse linee di azioni operative:

1. Ottimizzazione delle rotte di trasporto
2. Miglioramento della saturazione dei mezzi
3. Incremento dell'efficienza dei combustibili e dei sistemi propulsivi
4. Utilizzo di combustibili alternativi e sostenibili

Il primo fronte di azione è rappresentato dall'ottimizzazione delle rotte di trasporto, supportata dalla digitalizzazione e alla crescente disponibilità di dati operativi. La crescente diffusione di tecnologie digitali (es. sistemi di tracking e scambio informativo quali i TMS, Transportation Management Systems) a supporto dei processi logistici favorisce un uso più efficiente dei dati permettendo di ridisegnare i flussi ed ottimizzarne le rotte. Nello specifico, l'utilizzo di piattaforme di fleet management, algoritmi di route optimization e sistemi predittivi consentono di pianificare i percorsi in modo più efficiente, riducendo i chilometri a vuoto e limitando i tempi di inattività dei mezzi (McKinnon, 2015). L'impiego di tecnologie IoT ed AI permette inoltre di monitorare in tempo reale i consumi e le emissioni, fornendo indicatori utili per la gestione dinamica delle flotte (dynamic routing). Ad esempio, all'interno dei contesti urbani l'integrazione di tali sistemi mira a favorire la distribuzione nelle fasce orarie meno congestionate, contribuendo a diminuire sia il consumo energetico sia l'impatto ambientale complessivo dell'attività distributiva. Occorre tuttavia osservare come la diffusione di pratiche di raccolta dati sul campo per favorire misure di ottimizzazione della performance green siano ancora limitate e ad oggi permangano criticità nella raccolta dati empirici legati all'impatto ambientale (Barbieri et al., 2025).

Una seconda linea di azione riguarda il miglioramento della saturazione dei mezzi e la riduzione dei viaggi a vuoto. Diverse imprese stanno sviluppando piattaforme collaborative che permettono di condividere capacità di carico tra operatori diversi, al fine di incrementare pratiche di backhauling (i.e., ottimizzazione dei viaggi di ritorno) e load-sharing (e.g., trasporto a collettame). Queste soluzioni, oltre a ridurre le emissioni specifiche per tonnellata trasportata, aumentano l'efficienza complessiva della rete logistica, con benefici economici diretti per gli operatori (McKinnon et al., 2018). Anche l'adozione di modelli di distribuzione hub-and-spoke e di attività di magazzino come il cross-docking contribuiscono a massimizzare la saturazione dei mezzi e a ottimizzare i flussi di movimentazione, riducendo i viaggi a vuoto e consolidando le spedizioni.

Un'ulteriore linea di azione è legata all'incremento dell'efficienza dei combustibili e dei sistemi propulsivi. L'adozione di veicoli da trasporto merci di nuova generazione caratterizzati da un migliore rendimento energetico consentono potenzialmente di ridurre le emissioni globali delle attività di trasporto. Per contro, tali veicoli sono tipicamente caratterizzati da elevati costi di investimento e risulta quindi estremamente difficile implementarli in larga scala soprattutto per le piccole e medie imprese. In tale contesto ci sono alcune soluzioni digitali che potrebbero risultare una buona alternativa ai veicoli di nuova generazione. Ad esempio, i

sistemi di manutenzione e diagnostica predittiva (i.e., smart maintenance) permettono di mantenere le prestazioni dei mezzi ottimali nel tempo, evitando sprechi energetici e prolungando la vita utile delle flotte. Un'ulteriore strategia operativa riguarda l'adozione di tecniche di guida efficiente (i.e., eco-driving), supportate da programmi di formazione e da dispositivi di monitoraggio in cabina, che contribuiscono in maniera attiva a ridurre i consumi di carburante agendo esclusivamente sulle modalità di guida dei trasportatori. Nelle aree urbane, inoltre, si stanno diffondendo soluzioni di city logistics basate su micro-hub e mezzi leggeri elettrici o a pedalata assistita, come le cargo-bike, che permettono di gestire l'ultimo miglio in modo più sostenibile, riducendo traffico e inquinamento acustico. Tale approccio evidenzia che la mitigazione dell'impatto ambientale non è esclusivamente legata agli investimenti in soluzioni tecnologiche, ma richiede altresì cambiamenti comportamentali e organizzativi.

Infine, un'altra promettente linea di azione è rappresentata dall'utilizzo di combustibili alternativi e sostenibili. L'elettrificazione progressiva del trasporto almeno per la parte di logistica distributiva, attraverso l'impiego di veicoli elettrici a batteria (battery electric vehicle – BEV), sta diventando una realtà concreta laddove l'autonomia e le infrastrutture di ricarica risultano compatibili con le esigenze operative. Nel trasporto urbano e di prossimità, l'elettrificazione costituisce oggi una fra le soluzioni più promettenti. I BEV grazie a un'autonomia media di 150–300 km, risultano pienamente compatibili con le esigenze operative delle consegne last mile. Pur richiedendo ancora investimenti iniziali elevati e tempi di ricarica significativi, essi garantiscono un abbattimento quasi totale delle emissioni dirette e un notevole miglioramento delle condizioni ambientali nei centri urbani. La diffusione di infrastrutture di ricarica dedicate presso i centri distributivi e la progressiva riduzione dei costi delle batterie stanno favorendo un'accelerazione di questa transizione, anche grazie agli incentivi pubblici e ai programmi di sostegno europei. Nel medio termine, i biocarburanti come il bioLNG (Liquified Natural Gas), bio CNG (biometano, Compressed Natural Gas) e l'olio vegetale idrotrattato (hydrotreated vegetable oil – HVO) rappresentano un'opzione di facile implementazione in grado di ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>e anche dell'80% rispetto ai carburanti tradizionali e di valorizzare filiere locali basate su residui agricoli o rifiuti organici (Abanades et al., 2022; Subramanian et al., 2013; Chandra et al., 2011). Per le tratte di media-lunga distanza le soluzioni a bioCNG e/o bioLNG rappresentano ad oggi un'alternativa piuttosto diffusa (GGGI, 2024; Khan et al., 2023). Queste tecnologie offrono un buon compromesso tra impatto ambientale, costi di investimento e autonomia, rendendole adatte ai flussi di media-lunga percorrenza. L'impiego di biometano di origine agricola o da rifiuti organici consente inoltre di ridurre sensibilmente le emissioni dell'intero ciclo di vita del carburante (dalla sua produzione al suo utilizzo - well-to-wheel), valorizzando filiere locali e promuovendo un'economia circolare del trasporto. Allo stesso tempo, il biodiesel avanzato, in particolare l'HVO, si configura come un vettore di transizione efficace per il rinnovo delle flotte esistenti, poiché può essere impiegato nei motori diesel tradizionali senza modifiche sostanziali. A differenza dei biocarburanti di prima generazione come, ad esempio, il biodiesel (Bortel et al., 2019), l'HVO utilizza materie prime di scarto e residui industriali, contribuendo a ridurre sensibilmente l'impronta di carbonio lungo l'intero ciclo di vita. Un punto di forza dell'HVO rispetto ad altri combustibili sostenibili attualmente disponibili sul mercato è il suo potenziale utilizzo all'interno di veicoli tradizionali senza la necessità di apportare modifiche strutturali o

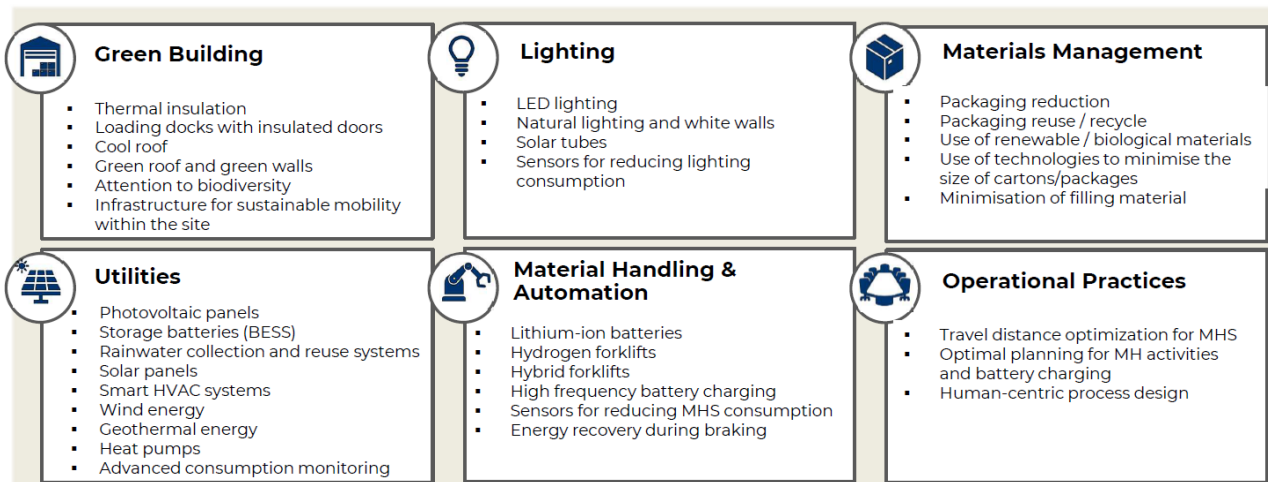
sostanziali. Per tale motivo, tale carburante potrebbe essere una valida alternativa per ridurre l'impatto ambientale dei veicoli tradizionali senza ricorrere alla sostituzione degli stessi. Tuttavia, la reale sostenibilità di tale soluzione dipende dalla disponibilità di infrastrutture di rifornimento, ad oggi ancora limitata, e dalla provenienza delle materie prime utilizzate per la produzione del combustibile. Per quanto riguarda i trasporti pesanti e a lunga percorrenza, l'idrogeno verde (attraverso l'utilizzo di veicoli a celle a combustibili - fuel cell electric vehicle, FCEV) si configura in prospettiva come un'ulteriore soluzione per la decarbonizzazione del trasporto su strada (Ball & Wietschel, 2009). L'idrogeno offre un'elevata densità energetica (elevata autonomia) e tempi di rifornimento molto rapidi, caratteristiche che lo rendono particolarmente adatto per le tratte di lunga distanza. Tuttavia, la sua produzione e distribuzione richiedono ancora elevati costi, ingenti investimenti per lo stoccaggio e un significativo sviluppo infrastrutturale (Moradi & Groth, 2019). Inoltre, il grado di sostenibilità ambientale di tale combustibile dipende fortemente dal grado di penetrazione dell'idrogeno verde, prodotto da fonti rinnovabili (attraverso la pratica dell'elettrolisi), rispetto a quello grigio, derivante da combustibili fossili (attraverso la pratica di steam-reforming del metano).

### **2.2.3. Sostenibilità ed efficienza energetica degli insediamenti ad uso logistico**

La sostenibilità ambientale è diventata un elemento strategico anche per il settore della logistica, e in particolare per gli immobili ad uso logistico, che oggi non possono più essere considerati semplici immobili di stoccaggio. La crescente attenzione relativa al loro impatto ambientale nasce dal fatto che gli immobili logistici rappresentano una componente significativa delle emissioni del settore logistico: secondo il World Economic Forum, i soli siti logistici sono responsabili dell'11% delle emissioni globali legate alla logistica. Inoltre, accanto ai consumi energetici, questi edifici incidono sul territorio per l'uso del suolo, la produzione di rifiuti, l'uso di acqua e materiali da costruzione. Le aree di consumo degli immobili logistici sono molteplici: i consumi elettrici e termici legati all'illuminazione, la climatizzazione e i sistemi di movimentazione dei materiali; l'uso di combustibili per il riscaldamento; il consumo di acqua per scopi igienico-sanitari o industriali; e infine la produzione e gestione dei rifiuti, in particolare quelli da imballaggio. Nel caso di immobili logistici a temperatura ambiente, gli ambiti che incidono in modo più significativo sul consumo di energia sono l'illuminazione e i sistemi di movimentazione, mentre per gli immobili a temperatura controllata è il raffrescamento/riscaldamento la quota preponderante. Varie certificazioni sono state sviluppate per quantificare l'efficienza energetica e l'impatto ambientale degli immobili; fra i principali si individualno gli standard LEED, sviluppato dallo U.S. Green Building Council, e BREEAM, sviluppato dal Building Research Establishment (BRE) nel Regno Unito. Tali certificazioni, non sviluppate specificatamente per immobili logistici ma ampiamente adottate anche per certificare immobili ad uso logistico, mirano a valutare le prestazioni dell'immobile sotto il profilo sia energetico che ambientale lungo tutto il ciclo di vita (considerando anche il processo di progettazione e costruzione dell'immobile). In Italia sono già diversi gli immobili logistici certificati, tra cui oltre 80 immobili logistici con certificazione LEED (di cui oltre 60 con classe GOLD o PLATINUM), e circa 190 di immobili ad uso industriale con certificazione BREEAM (dati al 2025). Tali certificazioni rappresentano un grande vantaggio competitivo per i proprietari degli immobili in quanto si stanno affermando

come criterio di valutazione per gli investitori, anche a fronte dello stretto legame con gli obiettivi SDG e alla crescente attenzione alla finanza sostenibile.

Accanto alla certificazione ambientale, sempre più le aziende hanno avviato azioni volte a migliorare le prestazioni energetiche ed ambientali degli immobili logistici in cui operano, sia per le nuove costruzioni (greenfield) sia in ottica brownfield o retrofitting. Sono numerosi gli ambiti di intervento e le specifiche soluzioni di green warehousing che si possono considerare. Le diverse leve su cui è possibile agire possono essere ricondotte a macroaree di intervento (Perotti and Colicchia, 2023; Tavolo di lavoro “Logistics Real-Estate e Intralogistica” dell’Osservatorio Contract Logistics “Gino Marchet” del Politecnico di Milano, 2024) mostrate in Figura 6.



**Figura 6.** Macroaree di intervento in ottica green warehousing per la diminuzione dell’impatto ambientale degli immobili logistici. Fonte: Osservatorio Contract Logistics “Gino Marchet”, Politecnico di Milano (2024).

**Green Building.** Tale macroarea include una serie di soluzioni che mirano ad aumentare le prestazioni energetiche ed ambientali della struttura fisica dell’immobile logistico (involucro edilizio). Gli interventi più rilevanti includono l’isolamento termico avanzato (che riduce i carichi di riscaldamento e raffrescamento), l’installazione di tetti riflettenti o tetti verdi (che mira a ridurre il manifestarsi dell’effetto isola di calore, riducendo a sua volta i carichi di raffrescamento), l’impiego di materiali da costruzione a basso impatto ambientale (riciclati, locali, o con certificazioni ambientali), l’installazione di baie di carico/scarico coibentate e di infrastrutture per la mobilità sostenibile (es. bike parking, colonnine per la ricarica elettrica dei veicoli).

**Utilities.** Questa categoria di soluzioni fa riferimento ad interventi impiantistici legati ai processi di produzione e distribuzione dell’energia elettrica e termica, all’approvvigionamento idrico, fino alla gestione dei rifiuti. Gli interventi principali includono l’installazione di impianti di produzione di energia rinnovabile (impianti fotovoltaici, eolici) o soluzioni ibride (come i sistemi di accumulo elettrochimico), l’utilizzo di pompe di calore al posto delle tradizionali caldaie a gas, e sistemi di ventilazione e climatizzazione intelligenti (smart) che si regolano in base alle condizioni ambientali o all’occupazione reale degli spazi. Anche il recupero e il riutilizzo dell’acqua piovana, l’uso di rubinetterie a basso flusso e sistemi per la misurazione dei consumi (es. Building Management Systems, BMS) sono elementi essenziali in questa

macroarea di interventi. L'obiettivo principale di tale categoria di soluzioni è quello di ottimizzare i carichi energetici, ridurre gli sprechi e di abbattere i costi operativi dell'immobile logistico.

**Illuminazione.** Tale categoria di soluzioni mira a ridurre consumi e impatto ambientale di una delle voci principali di consumo energetico nei magazzini (Dobers et al., 2022). Le soluzioni principali riguardano l'adozione di sistemi LED ad alta efficienza, associati a sensori di presenza e di luminosità, permettendo di illuminare solo le aree effettivamente utilizzate e di sfruttare al meglio la luce naturale. Alcuni impianti avanzati adottano anche sistemi di BMS che modulano l'illuminazione in tempo reale sulla base di logiche predittive o dati storici (Digital Addressable Lighting Interface, DALI). Anche il layout del magazzino incide sulle prestazioni luminose del magazzino, in cui pareti chiare e lucernari ben posizionati aumentano la riflessione luminosa e riducono il fabbisogno energetico.

**Movimentazione e automazione.** Questa macroarea riguarda una serie di soluzioni relative alla movimentazione interna delle merci (intra-logistica) e i sistemi automatizzati all'interno dell'immobile logistico. Gli interventi più impattanti da un punto di vista energetico riguardano l'adozione di carrelli elevatori con batterie a ioni di litio/idrogeno, azioni volte al miglioramento delle prestazioni energetiche dei sistemi automatizzati di stoccaggio (es. AS/RS, AVS/RS, Autostore, Skypod) e di movimentazione (es. AGV/AMR, robot mobili autonomi). Anche l'ottimizzazione dei flussi grazie a software WMS può ridurre drasticamente i tragitti inutili e i picchi di consumo. Inoltre, l'integrazione con impianti rinnovabili consente di alimentare direttamente i consumi legati alla movimentazione interna con energia autoprodotta, aumentando l'autoconsumo e riducendo di conseguenza l'impatto ambientale dell'immobile logistico.

**Gestione dei materiali.** In quest'area rientrano tutti gli interventi legati alla gestione efficiente dei materiali utilizzati nel magazzino, quali imballaggi e materiali di scarto. Le soluzioni più sostenibili includono la riduzione dell'over-packaging, l'impiego di packaging riutilizzabili o biodegradabili, l'utilizzo di materiali certificati o riciclati, e il recupero efficiente dei rifiuti. Tali interventi contribuiscono non solo alla riduzione dell'impatto ambientale ma anche all'ottimizzazione dei costi logistici, poiché incide direttamente sul volume e peso delle spedizioni. Infatti, sul mercato sono disponibili diversi software e algoritmi che mirano ad ottimizzare l'uso dell'imballaggio per ridurre il materiale impiegato in funzione del tipo di merce e della destinazione.

**Pratiche operative.** Questa macroarea di interventi riguarda l'insieme delle pratiche e dei comportamenti organizzativi/operativi che possono ridurre significativamente l'impatto ambientale. Rientrano in questa categoria la pianificazione ottimale delle attività di movimentazione e ricarica delle batterie, la progettazione ergonomica dei processi (human centric approach), il supporto alla mobilità sostenibile dei lavoratori (sustainable commuting), e tutta quella serie di strategie mirate all'efficienza energetica e riduzione dei consumi. Spesso sono proprio questi interventi ad offrire il miglior rapporto tra benefici ambientali e costi di implementazione.

Tuttavia, implementare concretamente queste soluzioni sostenibili negli immobili logistici resta una sfida complessa. Le principali barriere riguardano gli elevati costi di investimento iniziali, che spesso rappresentano un ostacolo significativo, soprattutto per le piccole-medie

imprese. Sebbene molti interventi siano economicamente vantaggiosi nel medio-lungo periodo (grazie alla riduzione dei consumi e alla valorizzazione dell'immobile), la fase di iniziale di implementazione richiede risorse finanziarie e capacità progettuale non sempre disponibili.

Un secondo elemento critico è la complessità tecnica degli interventi, in particolare nei siti logistici esistenti. L'adattamento di strutture datate a standard energetici moderni può comportare problemi legati alla compatibilità strutturale e alla gestione delle attività operative. A questo si aggiunge la difficoltà di integrazione con i sistemi già in uso, come software WMS, impianti HVAC o tecnologie di movimentazione. Infatti, spesso questi ecosistemi non sono progettati per comunicare tra loro o per gestire logiche di efficientamento energetico centralizzate, portando ad un'elevata complessità gestionale nell'implementazione di tali interventi.

Infine, una delle sfide più significative e "trasversali" rispetto al singolo ambito di azione riguarda la carenza di dati rilevati (Perotti et al., 2024). In molti magazzini, i consumi non vengono monitorati in maniera granulare, e le informazioni disponibili non permettono di distinguere tra le varie fonti/aree di consumo (illuminazione, movimentazione, riscaldamento, raffrescamento). In tali circostanze risulta difficile quantificare il reale impatto ambientale delle attività logistiche o valutare il ritorno sugli investimenti delle soluzioni implementate.

Per superare queste barriere, diventa essenziale adottare un approccio strategico che supporti una pianificazione di medio-lungo periodo e sono già in essere studi multidisciplinari volti a sviluppare strumenti di supporto alle decisioni, che possano configurarsi come una roadmap strutturata che aiuti le aziende nella scelta ed implementazione degli interventi per la riduzione del consumo energetico e dell'impatto ambientale (Cannava & Perotti, 2025). Il primo passo di tale roadmap dovrebbe essere un'analisi energetico-ambientale approfondita, capace di identificare con precisione le aree critiche dell'immobile logistico (es. eventuali inefficienze impiantistiche, consumi elevati non giustificati). A partire da tale situazione "as is", la roadmap dovrebbe consentire di stabilire le priorità d'intervento, individuando le azioni più efficaci e realizzabili in base a costi-benefici, obiettivi ESG aziendali e incentivi pubblici.

La roadmap dovrebbe altresì delineare una sequenza temporale chiara, suddivisa in: interventi a basso costo e di rapida implementazione nel breve termine (quick wins), interventi nel medio periodo, e interventi più radicali nel lungo periodo, il tutto da inserirsi in modo armonioso nell'ambito della strategia di sostenibilità dell'azienda stessa. A tal fine, si rende indispensabile l'implementazione di un sistema di monitoraggio continuo, che impieghi indicatori di performance energetici e ambientali affidabili per la misurazione dei risultati conseguiti, la correzione degli scostamenti e la promozione di un processo basato sul concetto di miglioramento continuo.

## **2.3 La Logistica 5.0 e l'approccio human centric**

In un contesto industriale sempre più guidato da digitalizzazione, automazione e sostenibilità, a partire dal 2021 si è progressivamente diffuso il nuovo paradigma dell'Industry 5.0, che si distingue dalla precedente rivoluzione 4.0 per un decisivo cambio di prospettiva. Con Industry 4.0, la logistica ha posto una forte enfasi sull'adozione di tecnologie digitali ed automazione con lo scopo di raggiungere una maggiore efficienza e consentire decisioni decentralizzate; Internet of Things, Big Data, machine learning, AI e realtà aumentata/virtuale

sono solo alcuni esempi delle tecnologie 4.0. Negli ultimi anni il governo italiano ha compiuto un passo importante verso la modernizzazione del suo sistema produttivo, grazie a una serie di incentivi pubblici che hanno avuto un impatto decisivo sull'evoluzione tecnologica delle imprese. Il tutto è iniziato nel 2016 con il lancio del Piano Nazionale Industria 4.0, il quale ha introdotto strumenti concreti che hanno facilitato l'adozione di tecnologie 4.0, contribuendo a trasformare in profondità anche il comparto logistico. Uno dei primi incentivi ad avere un impatto reale è stato l'iperammortamento, affiancato dal superammortamento, il quale permettevano alle imprese di dedurre dalle tasse una quota maggiorata del valore dei beni strumentali acquistati. Successivamente, il meccanismo è stato trasformato nel più accessibile credito d'imposta per investimenti in beni strumentali 4.0. Questo ha permesso di recuperare una parte significativa delle spese sotto forma di credito fiscale, da usare direttamente in compensazione. Tale meccanismo ha reso più fluido e rapido il ritorno dell'incentivo, e quindi più attraente anche per le piccole e medie imprese. A questi strumenti si sono aggiunti altri crediti d'imposta specifici, come quello per la ricerca e sviluppo, per l'innovazione tecnologica, per il design e per la formazione 4.0 (formazione del personale su tematiche relative al 4.0). Infine, con l'arrivo del PNRR (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza), tutti questi strumenti sono stati ulteriormente potenziati sotto l'ombrello della Transizione 4.0. Il PNRR ha rafforzato il credito d'imposta, introducendo maggiore liquidità, aliquote più alte e criteri più accessibili.

A partire dal 2021 ha iniziato a prendere forma il concetto di Industria 5.0, quando la Commissione Europea ha pubblicato il documento "Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry". Il nuovo paradigma 5.0 propone una nuova visione in cui l'operatore non è più un elemento da sostituire o "adattare" alla tecnologia, bensì un soggetto attivo e da valorizzare, al centro del processo di innovazione (Figura 7). Se Industry 4.0 ha posto al centro la digitalizzazione e l'automazione dei processi per migliorarne l'efficienza, in linea con le indicazioni della Commissione Europea (2021), l'Industry 5.0 integra tali soluzioni tecnologiche con valori fondamentali quali sostenibilità, resilienza e, soprattutto, il benessere dell'operatore secondo un approccio human-centric.

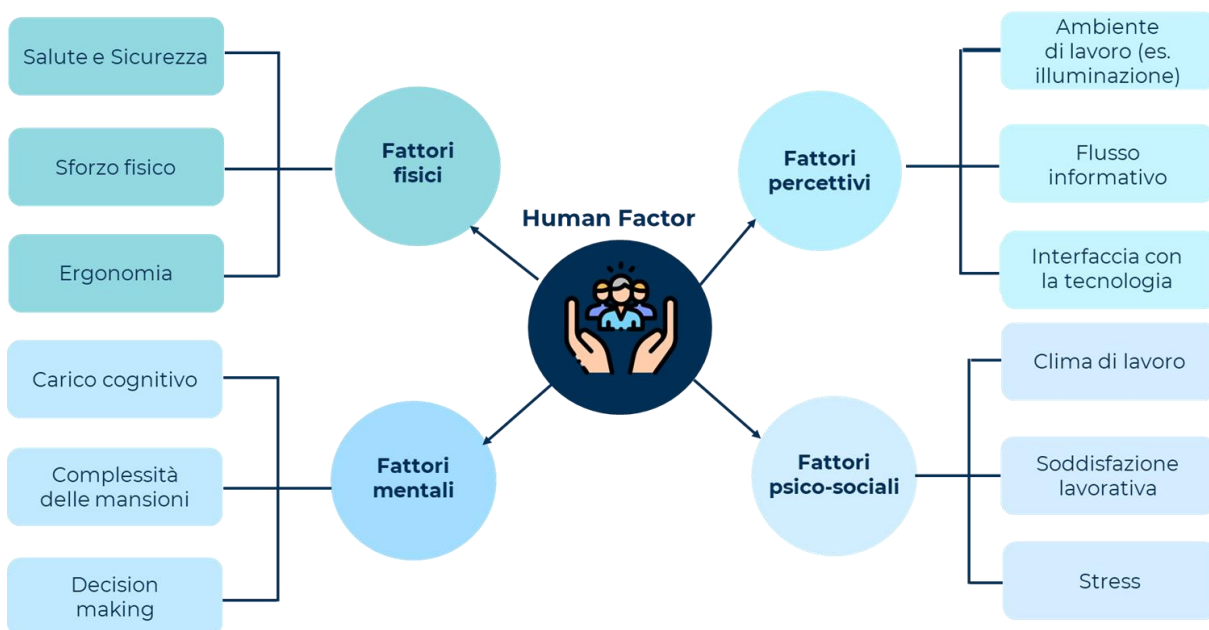


**Figura 7.** Concetto di Industry 5.0. Fonte: Commissione Europea (2021)

In questo contesto, anche la logistica è chiamata ad evolversi in una dimensione human-centric, diventando quindi “Logistica 5.0”. Tale nuovo modo di fare logistica va oltre la pure efficienza operativa. Infatti, esso non si limita alla sola integrazione di soluzioni digitali e di automazione, ma enfatizza anche il ruolo della componente umana, il benessere degli operatori e la necessità di una collaborazione sinergica tra uomo e macchina. L’obiettivo, quindi, non è solo quello di migliorare le prestazioni ambientali e la resilienza dei processi logistici, ma anche la creazione di ambienti di lavoro più inclusivi, sicuri e soddisfacenti, in linea con i principi dell’Industry 5.0 promossa dalla Commissione Europea.

Secondo il paradigma della Logistica 5.0, la tecnologia non sostituisce l’operatore, bensì lo “potenzia”, valorizzandone il ruolo e ottimizzandone i vari aspetti che lo caratterizzano. L’interazione tra operatori e sistemi automatizzati – come cobot o esoscheletri – è progettata per adattarsi ai bisogni delle persone, non il contrario. Per tale motivo, l’approccio human-centric mira a progettare tecnologie e ambienti di lavoro che si adattino alle capacità e ai bisogni e alla diversità degli operatori, non viceversa. Le soluzioni devono dunque supportare l’operatore – migliorandone la sicurezza, il comfort, l’efficienza e la soddisfazione – invece di relegarlo a un ruolo marginale.

In tale contesto, si identificano tipicamente quattro dimensioni legate al fattore umano: fattori fisici, fattori percettivi, fattori mentali e fatto psico-sociali (Figura 8).



**Figura 8.** L’approccio human-centric: le diverse dimensioni. Fonte: Politecnico di Milano, Progetto Human Tech – Gruppo Logistica (2025).

**Fattore fisico.** Qui l’attenzione è posta sulla salute e sicurezza sul lavoro, lo sforzo fisico richiesto all’operatore, l’ergonomia delle postazioni e il modo in cui l’ambiente di lavoro incide sull’operatore stesso. In questo contesto, trovano applicazione tecnologie quali esoscheletri, robot collaborativi (cobot) e interfacce ergonomiche intelligenti, progettate per alleggerire i carichi e prevenire gli infortuni. Le postazioni di lavoro sono pensate per adattarsi al corpo umano, riducendo l’affaticamento e favorendo movimenti naturali e sicuri. La collaborazione

uomo-macchina è quindi sinergica: i robot gestiscono compiti ripetitivi o fisicamente pesanti, mentre gli operatori si concentrano su attività ad alto valore cognitivo. In quest'ottica, la formazione e il reskilling del personale diventano fondamentali. Le future soluzioni devono essere intuitive e accessibili, ma anche accompagnate da percorsi di formazione, in grado di valorizzare il capitale umano e di garantire una transizione equa per tutti i lavoratori.

**Fattore mentale.** Qui l'attenzione è posta sul carico cognitivo, la complessità delle mansioni e il processo di decision-making. In ambienti logistici sempre più digitalizzati e connessi, il rischio è che l'operatore venga sovraccaricato da informazioni o responsabilità troppo complesse. Per tale motivo è fondamentale monitorare il carico cognitivo e i livelli di stress degli operatori (e.g., attraverso dispositivi indossabili o sensoristica). La Logistica 5.0 mira ad affrontare questo rischio attraverso sistemi intelligenti di supporto decisionale, che utilizzano strumenti come l'intelligenza artificiale per analizzare grandi volumi di dati e fornire raccomandazioni operative mirate, lasciando all'operatore il ruolo di supervisore e guida. Questo approccio mira a ridurre la fatica mentale ed aumentare l'efficacia decisionale. Per raggiungere tale obiettivo, monitorare lo stress dell'operatore rappresenta un passo fondamentale. D'altronde, una misurazione quantitativa dei livelli di stress rappresenta una vera e propria sfida per il mondo della logistica a causa delle numerose variabili in gioco e dalla necessità di implementare sistemi invasivi per la misurazione (dispositivi indossabili).

**Fattore percettivo.** Tale fattore si riferisce al modo in cui l'ambiente e le tecnologie vengono recepiti e interpretati dai lavoratori. Elementi come l'illuminazione, il rumore, il layout visivo, il flusso informativo e l'interfaccia uomo-macchina possono influenzare direttamente la qualità delle prestazioni. Nella Logistica 5.0, gli ambienti di lavoro sono progettati in modo adattivo, utilizzando sensori e algoritmi per regolare in tempo reale condizioni ambientali e modalità di interazione con i sistemi tecnologici. Questo rende l'interazione più intuitiva, fluida e meno stressante, migliorando la concentrazione e riducendo il margine d'errore.

**Fattori psico-sociali.** Qui l'attenzione si focalizza sul clima relazionale, la soddisfazione lavorativa e i livelli di stress percepito. La Logistica 5.0 promuove un modello organizzativo basato sul benessere psicologico, inclusività e partecipazione attiva, dove la collaborazione tra persone e tecnologie diventa una leva motivazionale. Il lavoratore è valorizzato non solo per la sua operatività, ma anche per la sua capacità di adattamento, apprendimento e problem solving. Ad esempio, in linea con tale visione, tecnologie come AI, realtà aumentata e Digital Twins sono viste come supporto alla formazione degli operatori durante le operazioni, adattarsi alla diversità umana (abilità, età, genere), e promuovere ambienti "fenceless" dove robot e umani coesistono in armonia. Tali obiettivi potrebbero essere raggiunti attraverso il coinvolgimento attivo degli operatori nella fase di sviluppo della tecnologia, così da assicurarsi che la tecnologia sviluppata sia in linea con le necessità e caratteristiche dell'operatore. Inoltre, strumenti di monitoraggio biometrico e feedback continuo potrebbero supportare nella prevenzione di situazioni di stress cronico, permettendo una gestione proattiva del benessere degli operatori.

## Riferimenti

- Abanades, S., Abbaspour, H., Ahmadi, A., Das, B., Ehyaei, M. A., Esmailion, F., ... & Silveira, J. L. (2022). A conceptual review of sustainable electrical power generation from biogas. *Energy Science & Engineering*, 10(2), 630-655. <https://doi.org/10.1002/ese3.1030>
- Ball, M., & Wietschel, M. (2009). The future of hydrogen—opportunities and challenges. *International journal of hydrogen energy*, 34(2), 615-627. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.014>
- Banomyong, R. and Beresford, A.K. (2001), “Multimodal transport: the case of Laotian garment exporters”, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, Vol. 3 No. 9, pp. 663-685. <https://doi.org/10.1108/0960003011040816>
- Barbieri, F., Cannava, L., Colicchia, C. and Perotti, S. (2025), "Modelling the environmental performance of logistics distribution processes: a business case in the agri-food supply chain", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 32 No. 11, pp. 51-78. <https://doi.org/10.1108/BIJ-07-2024-0634>
- Bortel, I., Vávra, J., & Takáts, M. (2019). Effect of HVO fuel mixtures on emissions and performance of a passenger car size diesel engine. *Renewable Energy*, 140, 680-691. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.067>
- Brockmann, M., Brannan, N., Laghman, H., Cheng, L., et al. (2025). *Navigating the Tracks Ahead: Top Trends in Railway Industry*. Nextcontinent. Disponibile su: <https://www.nextcontinent.net/wp-content/uploads/2024/09/Navigating-the-Tracks-Ahead-Top-Trends-in-Railway-Industry.pdf>
- Cannava, L., & Perotti, S. (2025). From warehouses to Net-Zero logistics facilities: A simulation-based roadmap to achieve carbon reduction and energy efficiency. *Computers & Industrial Engineering*, 201, 110944. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.110944>
- Chandra, R., Vijay, V. K., Subbarao, P. M. V., & Khura, T. K. (2011). Performance evaluation of a constant speed IC engine on CNG, methane enriched biogas and biogas. *Applied energy*, 88(11), 3969-3977. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.032>
- Cuong, T., et al. (2024). *Safe operations of a reach stacker by computer vision in an automated container terminal*. *Alexandria Engineering Journal*. Disponibile su: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016824009803?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016824009803?utm_source=chatgpt.com)
- Da Costa Barros, Í. R., & Nascimento, T. P. (2021). Robotic mobile fulfillment systems: A survey on recent developments and research opportunities. *Robotics and Autonomous Systems*, 137, 103729. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103729>
- Dobers Kerstin, Perotti Sara, Wilmsmeier Gordon, Mauer Gordon, Jarmer Jan-Philipp, Spaggiari Luisa, Hering Martin, Romano Scarlet, Skalski Mira (2023), Sustainable logistics hubs: greenhouse gas emissions as one sustainability key performance

indicator. *Transportation Research Procedia*, 72:1153–60.

<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.572>

European Commission. (2021). *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. Ultimo accesso in data 12/07/2025

<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/468a892a-5097-11eb-b59f-01aa75ed71a1/>

European Commission. (2021). *Industry 5.0. Research and Innovation*. Ultimo accesso in data 12/07/2025. [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50\\_en](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en)

EWG (2025). *5G, Digital Twin and AI inside one of Europe's most innovative intermodal terminals*. RailFreight. Disponibile su:

<https://www.railfreight.com/railfreight/2025/10/01/5g-digital-twin-and-ai-inside-one-of-europes-most-innovative-intermodal-terminals/>

GLEC Framework (2024), “Smart freight centre: global logistics emission council framework”, available at: <https://www.smartfreightcentre.org/en/our-programs/emissions-accounting/global-logistics-emissions-council/calculate-report-glec-framework/>

Global Green Growth Institute (GGGI) (2024). “Fueling the future: a report on biocng with best practices and case studies”, available at: <https://gggi.org/report/fueling-the-future-a-report-on-biocng/>

Gülsoylu, E., Abdelhalim, A., Boztas, D.K., Grasse, O., Jahn, C., Frintrop, S., Edinger, J. (2025). *Automatic Intermodal Loading Unit Identification using Computer Vision: A Scoping Review*. arXiv preprint. Disponibile su: <https://arxiv.org/abs/2509.17707>

International Energy Agency (2023), “Greenhouse gas emissions from energy”, available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>

ISO 14083 (2023), “Greenhouse gases — quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations”, available at:

<https://www.iso.org/standard/78864.html>

ISPRA. (2021). *Il settore dei trasporti: scenari emissivi ed energetici*.

ISPRA. (2022). *Le emissioni da trasporto Serie storiche e scenari*.

ISPRA. (2025). *Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2023. National Inventory Document 2025*

Khan, M. Z. A., Khan, H. A., Ravi, S. S., Turner, J. W., & Aziz, M. (2023). Potential of clean liquid fuels in decarbonizing transportation—An overlooked net-zero pathway?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113483. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113483>

KIBA Project (2025). *AI boosts rail freight efficiency: KIBA project successfully completed*. INFORM Software. Disponibile su: <https://www.inform->

[software.com/en/news/syncrotess/ai-boosts-rail-freight-efficiency-kiba-project-successfully-completed](https://www.ibm.com/software.com/en/news/syncrotess/ai-boosts-rail-freight-efficiency-kiba-project-successfully-completed)

- Li, J., Qin, R., Olaverri-Monreal, C., Prodan, R., & Wang, F. Y. (2023). Logistics 5.0: From intelligent networks to sustainable ecosystems. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 8(7), 3771-3774. <https://doi.org/10.1109/TIV.2023.3295796>
- McKinnon, A. (2018). *Decarbonizing logistics: Distributing goods in a low carbon world*. Kogan Page Publishers.
- McKinnon, A., Browne, M., Whiteing, A., & Piecyk, M. (2015). *Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics*. Kogan Page Publishers.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2024). *Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti*.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. (2025). *Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti*.
- Moradi, R., & Groth, K. M. (2019). Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International journal of hydrogen energy*, 44(23), 12254-12269. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041>
- Neugebauer, J., Heilig, L., Voß, S. (2024). *Digital Twins in the Context of Seaports and Terminal Facilities*. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 36(3), 821–917. <https://doi.org/10.1007/s10696-023-09515-9>
- Osservatorio Contract Logistics Gino Marchet, Politecnico di Milano, 2024. *Robot as a Service (RaaS)*.
- Dossier Logistica (2025). *La rivoluzione degli AMR*, marzo 2025.
- Pasparakis, A., De Vries, J., & De Koster, R. (2023). Assessing the impact of human–robot collaborative order picking systems on warehouse workers. *International Journal of Production Research*, 61(22), 7776-7790. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2183343>
- Perotti, S., Pratavia, L.B. and Melacini, M. (2022), “Assessing the environmental impact of logistics sites through CO<sub>2</sub>eq footprint computation”, *Business Strategy and the Environment*, Vol. 31 No. 4, pp. 1679-1694. <https://doi.org/10.1002/bse.2976>
- Perotti, S., Cannava, L., Ries, J. M., & Grosse, E. H. (2024). Reviewing and conceptualising the role of 4.0 technologies for sustainable warehousing. *International Journal of Production Research*, 63(6), 2305–2337. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2396015>
- Perotti, S., Lazzaroni, M., Ortiz, J., Binda, S. F., & Tudisco, V. (2025). Assistive technologies and the human factor in warehousing: a picking experimental case with active and passive exoskeletons. *Procedia Computer Science*, 253, 1601-1610. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.222>

- Railmarket (2025). *DB Cargo prepares fully automated shunting locomotive for series production*. Disponibile su: <https://railmarket.com/news/technology-innovation/31725-db-cargo-prepares-fully-automated-shunting-locomotive-for-series-production?region=ap>
- RFI (2024). *MaDe4Rail – nuovi sistemi di mobilità per merci su ferro*. Disponibile su: <https://www.rfi.it/it/innovazione-e-ricerca/progetti/nuovi-sistemi-di-mobilita/made4rail.html>
- RFI. (2024). Piano Commerciale per il business merci.
- Sarp, Y., Altuntas, C., Tashman, L. (2024). *European Transport Research Review*, 16:58. <https://doi.org/10.1186/s12544-024-00679-5>
- Subramanian, K. A., Mathad, V. C., Vijay, V. K., & Subbarao, P. M. V. (2013). Comparative evaluation of emission and fuel economy of an automotive spark ignition vehicle fuelled with methane enriched biogas and CNG using chassis dynamometer. *Applied Energy*, 105, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.011>
- Singh, P., Elmi, Z., Meriga, V.K., Pasha, J., Dulebenets, M.A. (2022). *Internet of Things for sustainable railway transportation: Past, present, and future*. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 4, 100065. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100065>
- Sirohi, N., Kumar, R. (2025). *Port Automation Horizons*. *Port Technology International*, Edition 154. Disponibile su: [https://www.porttechnology.org/wp-content/uploads/2025/09/PTI154\\_Port-Automation-Horizons.pdf](https://www.porttechnology.org/wp-content/uploads/2025/09/PTI154_Port-Automation-Horizons.pdf)
- Tavolo di lavoro “logistics real-estate and intralogistic” (2024). Osservatorio Contract Logistics “Gino Marchet”, Politecnico di Milano.
- Thompson, E.A., Lu, P., Kofi, P. (2025). *Revolutionizing railway systems: A systematic review of Digital Twin technologies*. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2025.104434>
- Zou, B., Koster, R. D., & Xu, X. (2018). Operating policies in robotic compact storage and retrieval systems. *Transportation Science*, 52(4), 788-811. <https://doi.org/10.1287/trsc.2017.0786>



## **Appendice: nota metodologica**

Il presente documento è stato stilato sulla base dell'esamina delle più recenti fonti secondari ed accademiche nazionali ed internazionali disponibili, con riferimento al comparto oggetto di indagine. Le fonti consultate sono specificate nel documento e riportate in via estesa all'interno della sezione "riferimenti".