



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

A.a. 2023/2024

Sessione di Laurea Ottobre 2024

**Innovazione nel segnalamento ferroviario:
analisi delle tecnologie e delle dinamiche
evolutive mediante l'uso di modelli e
strumenti analitici**

Relatore:

Prof.ssa Francesca Montagna

Candidato:

Micaela Chiarappa

INDICE

INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO I	
1.0 I paradigmi tecnologici.....	4
1.1 SCMT	5
1.2 SSC.....	7
1.3 ETCS/ERTMS.....	9
1.3.1 FRMCS.....	12
1.4 ATO.....	13
1.5 CBTC	15
1.6 ERSAT	16
CAPITOLO II	
2.0 Modello Lineare dei Processi Innovativi	19
2.1 Modello di Henderson e Clark	21
2.2 Gli Indicatori di Performance.....	27
2.3 Modello di Abernathy e Utterback.....	39
2.4 Modello di Rogers (o modello di Moore)	47
CAPITOLO III	
3.0 Analisi PESTEL	53
3.1 Fattore Politico	56
3.2 Fattore Economico	61
3.3 Fattore Sociale.....	66
3.4 Fattore Tecnologico.....	68
3.5 Fattore Ambientale.....	71
3.6 Fattore Legale.....	74
CONCLUSIONE.....	78
Bibliografia.....	80
Sitografia	82
Indice delle figure.....	84
Indice delle tabelle.....	87

INTRODUZIONE

Il futuro del trasporto ferroviario si preannuncia ricco di innovazioni e cambiamenti significativi. Con una rete infrastrutturale vasta e complessa, l'Europa è un banco di prova ideale per le nuove tecnologie e le soluzioni innovative che possono essere esportate a livello globale. L'Unione Europea sta investendo massicciamente nel potenziamento del trasporto su rotaia, riconoscendolo come una delle chiavi per raggiungere gli obiettivi di sostenibilità e riduzione delle emissioni di carbonio fissati per il 2030.

Il contesto politico, sociale ed economico europeo rappresenta un **terreno fertile per le aziende che operano nel settore ferroviario**, dando loro l'opportunità di giocare un ruolo di primo piano nel plasmare il futuro della mobilità su rotaia. Le aziende che sapranno cogliere le opportunità offerte da innovazione e sostenibilità guideranno l'industria verso nuove frontiere, contribuendo a creare reti ferroviarie più sicure, efficienti e rispettose dell'ambiente. La digitalizzazione, l'efficienza energetica e la sostenibilità sono i pilastri su cui si baserà il **futuro della mobilità su rotaia**, e le aziende devono essere pronte a innovare e adattarsi a queste nuove sfide.

Le politiche di finanziamento e incentivo per progetti sostenibili stanno accelerando l'adozione di tecnologie avanzate, rendendo l'Europa un leader mondiale nella transizione verso un trasporto ferroviario più verde. Questa spinta non solo stimola lo sviluppo di nuove soluzioni, ma crea anche un contesto favorevole per la collaborazione tra imprese, istituzioni e centri di ricerca, rendendo il mercato europeo un **laboratorio a cielo aperto per il futuro della mobilità ferroviaria**. Del resto, il mercato ferroviario globale è oggi a un punto di svolta, per la crescente domanda di mobilità sostenibile e l'avanzare del progresso tecnologico.

Alla base dello studio che segue, c'è la necessità europea, ma anche globale, di infrastrutture più efficienti, sicure, e con basso impatto ambientale.

Le **soluzioni intelligenti, l'automazione avanzata e l'integrazione dei sistemi IoT** stanno emergendo come elementi chiave per garantire un trasporto ferroviario più efficiente.

L'obiettivo è creare una rete di trasporti che sia non solo più efficiente, ma anche più resiliente e adattabile ai cambiamenti futuri, contribuendo in maniera significativa alla lotta contro il cambiamento climatico, attraverso la diffusione della tecnologia ERTMS. L'implementazione dell'ERTMS è il progetto industriale principale che servirà a rendere il trasporto ferroviario più

sicuro e competitivo e ad aumentare il livello di integrazione del sistema ferroviario europeo. Questo sistema europeo comune e la sua implementazione costituiranno la spina dorsale di un sistema ferroviario digitale e saranno il fattore principale per il raggiungimento di un'unica area ferroviaria europea [1].

L'Unione Europea ha posto l'attenzione su alcuni obiettivi da raggiungere nella mobilità ferroviaria: aumento della sicurezza ferroviaria, interoperabilità tra Paesi, aumento della capacità delle linee ferroviarie, investimenti notevoli e riduzione delle emissioni di CO₂. Tali aspetti possono essere risolti con l'evolversi di tecnologie sempre più innovative.

L'aspetto chiave attorno al quale ruota l'analisi è l'innovazione e il sottostante progresso della tecnologia. L'innovazione è molto importante per le persone e per l'economia. Il concetto di innovazione si lega sempre alla tecnologia, ovvero al sistema in uso e alla sua applicabilità/producibilità, ma anche all'economia, agli aspetti sociali e di mercato. L'innovazione è intesa come contributo dei singoli e delle imprese. È un fattore abilitante nei casi di gravi crisi in cui le imprese si muovono verso la sostenibilità. La crescita economica di un Paese e l'innovazione sono due variabili fortemente correlate, perché spesso la crescita di un Paese dipende dal fatto che il paese sia innovativo e crei valore e, al tempo stesso, le condizioni economiche di un Paese servono per produrre innovazione [2].

Il presente lavoro di tesi si pone l'obiettivo di definire quale sarà il dominant design tra le tecnologie studiate del segnalamento ferroviario, ovvero, di individuare l'architettura di prodotto. Il mercato tra tutte le tecnologie possibili, sceglierà una specifica architettura o tecnologia, valutandola nell'ottica di un rapporto costi- benefici.

L'analisi per arrivare a definire la tecnologia dominante, si articola in tre capitoli.

Nel primo capitolo "Le tecnologie del segnalamento ferroviario", sono analizzate tutte le tecnologie del segnalamento ferroviario, presenti sul mercato o ancora in fase di studio. L'attenzione è posta sui componenti fisici che caratterizzano ciascuna tecnologia, e sulle interazioni tra loro. Le tecnologie di seguito analizzate, in ordine di inserimento sul mercato, sono: SCMT (sistema di controllo marcia treno), SSC (sistema di supporto alla condotta), ERTMS (european railway traffic management system) o anche definito ETCS (european train

control system), ATO (automatic train operation), CBTC (communication based train control), ed ERSAT (ERTMS + SATellite).

Il secondo capitolo “Modelli e strumenti analitici per definire il Dominant Design” è il fulcro dell’elaborato. Partendo dalle tecnologie individuate e dai dati ricavati, relativi a ciascuna tecnologia, si procede con un’analisi attraverso i modelli della teoria dell’innovazione. Prima di tutto, vengono posizionate le tecnologie nelle diverse fasi del modello lineare dell’innovazione, ovvero nella fase di ricerca di base, ricerca applicata, fase pre competitiva o competitiva. La rappresentazione delle tecnologie con i diagrammi a blocchi consente di visualizzare meglio la tecnologia nei componenti e nelle relazioni e quindi, di capire di che tipo di tecnologia si tratta, se architeturale, incrementale, modulare o radicale, rispetto alla tecnologia tradizionale, utilizzando il modello di Henderson e Clark. Per poter confrontare le tecnologie sulla base delle loro performance e definire la tecnologia emergente, sono individuati uno o più indicatori di performance che meglio possano descrivere tutte le tecnologie. Da questi indicatori, sono realizzate le curve ad S per identificare in che fase si trova la tecnologia. Con il modello di Abernathy e Utterback alle curve degli indicatori di performance, si aggiungono quelle delle vendite, del numero di imprese che si occupano della tecnologia e del tasso di innovazione. La tecnologia emersa viene studiata con il modello di Rogers e Moore per comprendere a che livello di sviluppo della tecnologia sui propri territori si trovi ciascun Paese dell’Unione Europea.

Nel terzo ed ultimo capitolo, viene inquadrato il tema del segnalamento ferroviario con l’analisi PESTEL, affrontando il tema della politica, dell’economia, della società, della tecnologia, dell’ambiente e legale. Questi sei fattori aiutano a individuare quali sono gli elementi che facilitano l’adozione, quali la ostacolano.

Dall’unione dell’analisi del secondo capitolo che affronta l’aspetto tecnico, e del terzo capitolo che affronta aspetti politici, sarà possibile definire se la tecnologia emersa come dominant design sarà realmente attuata da tutti i Paesi dell’Unione Europea.

CAPITOLO I

Le tecnologie del segnalamento ferroviario

1.0I paradigmi tecnologici

Il seguente studio si pone l'obiettivo di analizzare le tecnologie innovative relative alla sicurezza e al controllo ferroviario attualmente presenti nel mercato o ancora in fase di studio.

È importante precisare alcune assunzioni su cui si è basata la ricerca:

- In Europa attualmente sono presenti diverse tecnologie per il segnalamento ferroviario simili a quelle Italiane. Per questo, per semplicità, di seguito sono analizzati i sistemi SCMT e SSC utilizzati sulla linea ferroviaria italiana, così come il sistema ERTMS/ETCS che corrisponde all'analogo PCT del mercato americano.
- Le ricerche di paper e brevetti sono state condotte selezionando le analisi e le tecnologie dei più importanti player ferroviari in modo da avere maggiore accuratezza e validità delle informazioni. Le informazioni, quindi, sono state raccolte da paper o brevetti di aziende come RFI, Alstom, Siemens, Hitachi Rail e documenti interni all'azienda AngelStar.

Per svolgere un'analisi dettagliata e arrivare a definire il paradigma del futuro, è importante analizzare nel dettaglio le tecnologie che ad oggi sono conosciute, sia quelle diffuse, sia solo in una fase iniziale di studio. Le tecnologie specifiche per il segnalamento ferroviario che garantiscono sicurezza ed efficienza della linea, sono:

- SCMT
- SSC
- ETCS L1
- ETCS L2
- ETCS L3
- FRMCS
- ATO
- CBTC
- ERSAT

Di seguito è presente una descrizione dettagliata di tali tecnologie nelle loro componenti architettoniche e funzionalità tecniche [3].

1.1 SCMT

Il **Sistema Controllo Marcia Treno (SCMT)**, sviluppato a partire dal 2000, è un sistema di sicurezza della marcia dei treni di ausilio al macchinista applicabile su linee elettrificate delle reti fondamentali, complementari e di nodo, a semplice o a doppio binario. Il sistema è certificato fino alla velocità massima di 250 Km/h e ha richiesto una complessa fase di sviluppo e omologazione in accordo con le attività di Verifica, Validazione e Valutazione definite dalle normative europee CENELEC applicabili in materia e fatte proprie da RFI. SCMT fornisce il controllo della velocità massima ammessa, istante per istante, in relazione ai vincoli posti dal segnalamento, dalle caratteristiche dell'infrastruttura e dalle prestazioni del treno, sia in condizioni normali che di degrado, utilizzando una tecnologia trasmissiva a balise, integrata ove presente con il Blocco Automatico a Correnti Codificate (BACC).

Come illustrato in Figura 1, il sistema è composto da:

- un **Sotto Sistema di Terra (SST)**, presente sui binari e formato da **encoder, cavi e boe**. Ha il compito di trasferire a bordo del locomotore, tramite punti informativi (tecnologia a boe), le informazioni sull'aspetto del segnale, ovvero le condizioni sulla libertà della via e sulle caratteristiche della linea;
- un **Sotto Sistema di Bordo (SSB)**, a bordo del treno, composto da un **computer** che ha il compito di elaborare le informazioni acquisite dalle boe, da eventuali codici del binario e dalle operazioni del personale di macchina, e che è in grado di comandare la frenatura di servizio o di urgenza nel caso in cui vengano superati i vincoli di marcia controllati dal sistema.

Il sistema di trasmissione SCMT è **discontinuo**. Gli encoder sono dei calcolatori che si interfacciano con gli impianti di sicurezza e segnalamento e ricevono in ingresso, da questi ultimi, l'aspetto dei segnali presenti lungo la linea. Sulla base degli aspetti dei segnali, gli encoder stabiliscono lo specifico "telegramma" (composto da una sequenza di bit) da inviare via cavo alle boe disposte sui binari, tra le rotaie, in corrispondenza dei vari segnali. Le boe poste sul binario (agganciate alle traverse) si attivano al passaggio di un treno e inviano informazioni al Sotto Sistema di Bordo. Ogni **punto informativo** è costituito da almeno due

boe poste a distanza ravvicinata. Il fatto che ogni punto informativo è costituito da almeno due boe permette:

- di verificare da parte del SSB la correttezza delle informazioni ricevute che vengono trasmesse in maniera ridondata;
- di individuare se il messaggio è rivolto al proprio treno a seconda del senso di marcia dello stesso. Ad esempio, il punto informativo del segnale di protezione di una linea a semplice binario non deve essere "letto" da un treno in partenza; il punto informativo di un segnale di partenza che comanda il senso di marcia opposto (rispetto al movimento del proprio treno) e posto all'inizio del binario di ricevimento, non deve essere letto da un treno in arrivo.

I dati che vengono trasmessi dal SST sono:

- la **velocità massima ammessa** dalla linea;
- il **grado di frenatura - pendenza della linea**;
- la **velocità massima ammessa rispetto a rallentamenti o riduzioni di velocità temporanee** di un tratto di linea;
- **l'aspetto del segnale** appena superato.

Le elaborazioni del SSB sono effettuate anche sulla base dei parametri del treno introdotti all'origine della corsa, e determinano i tetti e le curve di velocità che consentono la protezione della marcia del treno. Attraverso i dati elencati, il SSB calcola, tenendo conto delle caratteristiche di composizione del treno (% di massa frenata, lunghezza, ecc.), qual è la velocità massima che deve tenere il convoglio in ogni momento della sua marcia. Qualora il dato ricevuto comporti una riduzione di velocità (compreso l'arresto) ad una determinata distanza (velocità obiettivo e distanza obiettivo), il SSB calcola una "curva di frenatura" che permetta al SSB stesso di controllare se il macchinista sta rispettando o meno le indicazioni ricevute dai segnali della linea e dalle prescrizioni in possesso.

Il Sotto Sistema di Bordo SCMT può presentarsi in una versione stand-alone, in una versione integrata con le funzionalità SSC o come modulo di Sistema Nazionale integrato nel SSB ERTMS/ETCS.

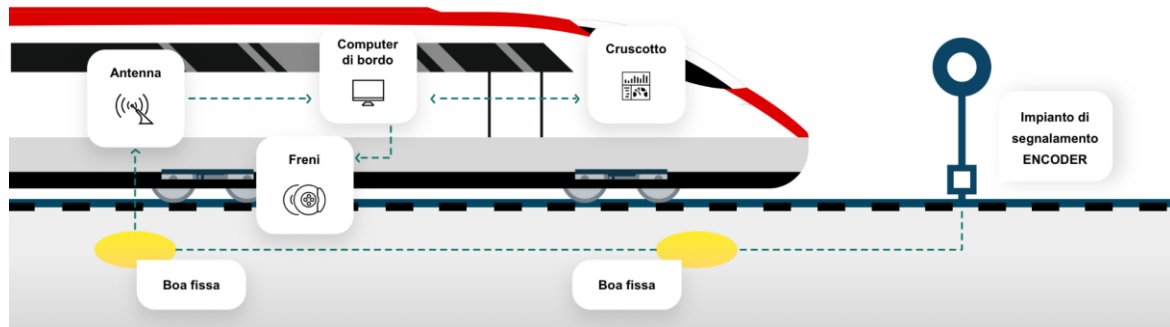


Figura 1- Componenti fondamentali e interazioni della tecnologia SCMT

1.2 SSC

Il **Sistema Supporto Condotta (SSC)**, sviluppato a partire dal 2005, è un sistema di sicurezza della marcia dei treni di ausilio al macchinista. Fornisce il controllo della velocità massima ammessa, istante per istante, in relazione ai vincoli posti dal segnalamento, dalle caratteristiche dell'infrastruttura e dalle prestazioni del treno, sia in condizioni normali che di degrado. Il sistema è applicabile su linee non elettrificate della rete complementare e la cui velocità massima è di 150 Km/h, a semplice o doppio binario. Ha richiesto una complessa fase di sviluppo e omologazione in accordo con le attività di Verifica, Validazione e Valutazione definite dalle normative europee CENELEC applicabili in materia e fatte proprie da RFI.

Il sistema è trasparente per il macchinista, che continua ad operare con le abituali modalità di condotta. È composto, come illustrato in Figura 2, da:

- un **Sotto Sistema di Terra (SST)**, che ha il compito di trasferire a bordo del locomotore, tramite punti informativi (realizzati con tecnologia trasmissiva con **transponder-trasmittitori**- a microonde di tipo "Telepass", integrata da tecnologia a boe), le informazioni sull'aspetto del segnale (condizioni sulla libertà della via) e sulle caratteristiche della linea;
- un **Sotto Sistema di Bordo (SSB)**, composto da un **computer** che ha il compito di elaborare le informazioni acquisite dai transponder e dalle operazioni del personale di

macchina, e che è in grado di comandare la frenatura di servizio o di urgenza nel caso in cui vengano superati i vincoli di marcia controllati dal sistema.

Il SSB che implementa le funzioni SSC integra sempre anche le funzioni SCMT: non è ammessa una configurazione SSB che realizzi le sole protezioni SSC.

Il sistema di trasmissione è **discontinuo**. I punti informativi sono costituiti da trasmettitori/transponder posizionati normalmente sui pali/portali dei segnali di avviso, protezione e partenza. Solo in alcuni casi, in precedenza ad un segnale di avviso, è posto un punto informativo supplementare detto "**tag**". I punti informativi trasmettono i messaggi a **quattro antenne GPS/GSM** (poste due anteriormente e due posteriormente ciascuna a sinistra e a destra del mezzo) poste sul tetto del mezzo di trazione. Al fine di poter distinguere i messaggi trasmessi da punti informativi posti su segnali adiacenti e riferiti a binari diversi, questi utilizzano due frequenze diverse di trasmissione a seconda che siano posti a sinistra o a destra del binario.

I dati che vengono trasmessi dal SST sono:

- la **velocità massima ammessa** dalla linea;
- il **grado di frenatura** della linea;
- la **velocità massima ammessa rispetto a rallentamenti o riduzioni di velocità temporanee** di un tratto di linea (ancora non implementato);
- **l'aspetto del segnale** appena superato.

Attraverso questi dati il SSB calcola, tenendo conto delle caratteristiche di composizione del treno (% di massa frenata che è preimpostata per ogni mezzo e non modificabile), qual è la velocità massima che deve tenere il convoglio in ogni momento della sua marcia. Qualora il dato ricevuto comporti una riduzione di velocità (compreso l'arresto) ad una determinata distanza (velocità obiettivo e distanza obiettivo), il SSB calcola una "curva di frenatura" a scalini che permetta al SSB stesso di controllare se il macchinista sta rispettando o meno le indicazioni ricevute dai segnali della linea e dalle prescrizioni in possesso.

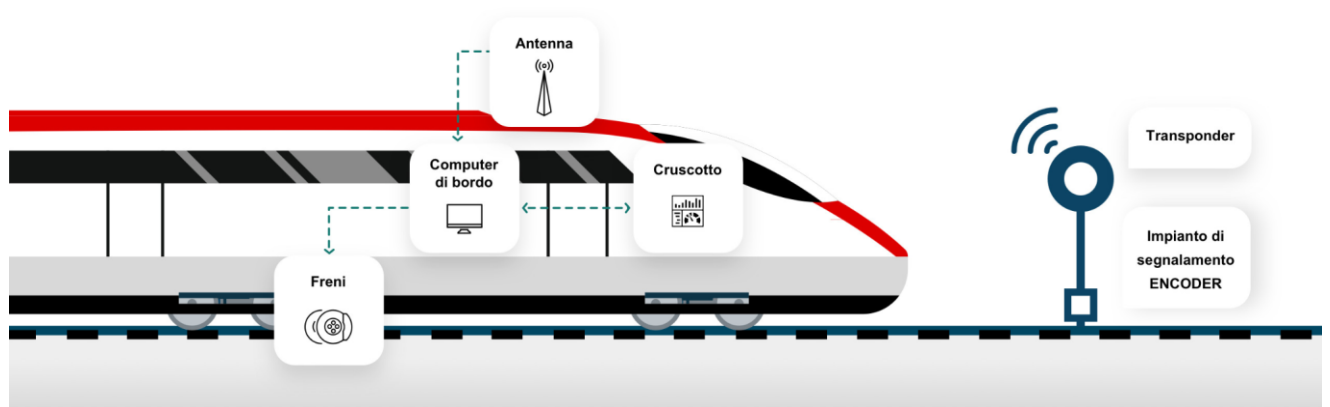


Figura 2 - Componenti fondamentali e interazioni della tecnologia SSC

1.3 ETCS/ERTMS

In ambito europeo si è deciso di avere un unico sistema di controllo della marcia che consenta di conseguire la piena interoperabilità tecnica, prevedendo di installare a bordo un solo sistema tecnologico, che è per l'appunto lo **European Railway Traffic Management System o European Train Control System (ERTMS/ETCS)** [4].

L'ERTMS ha due sistemi:

- ETCS (European Train Control System), uno standard di controllo del treno, basato su apparecchiature in cabina in grado di supervisionare i movimenti del treno e di fermarlo in base alla velocità consentita in ciascuna sezione della linea, insieme al calcolo e alla supervisione della velocità massima del treno. La risposta del personale di condotta viene costantemente monitorata e, se necessario, il sistema impone la frenatura di emergenza.
- GSM- R (Global System for Mobile Communications- Railways) è il secondo sistema ERTMS, lo standard europeo di comunicazioni radio per le operazioni ferroviarie. Il GSM-R utilizza bande di frequenza che permettono la comunicazione fra il treno e l'infrastruttura.

Spesso, viene utilizzato il nome di ETCS in sostituzione al termine ERTMS.

Il sistema ERTMS può presentarsi in tre differenti "Livelli"[5]:

L'ERTMS Livello 1 ha un'architettura sostanzialmente analoga a quella dell'SCMT e prevede che il computer di bordo supervisioni **continuamente** la velocità massima consentita e calcoli la curva di frenatura fino al punto in cui il treno può procedere, mentre avviene una comunicazione non continua tra treno e boe (disposte lungo i binari), generalmente attraverso l'Eurobalise, come mostrato in Figura 3.

L'ERTMS Livello 1, pur consentendo di conseguire una interoperabilità tecnica, non consente tuttavia di conseguire una completa interoperabilità operativa in quanto prevede che si continuino ad utilizzare i segnali laterali nazionali.

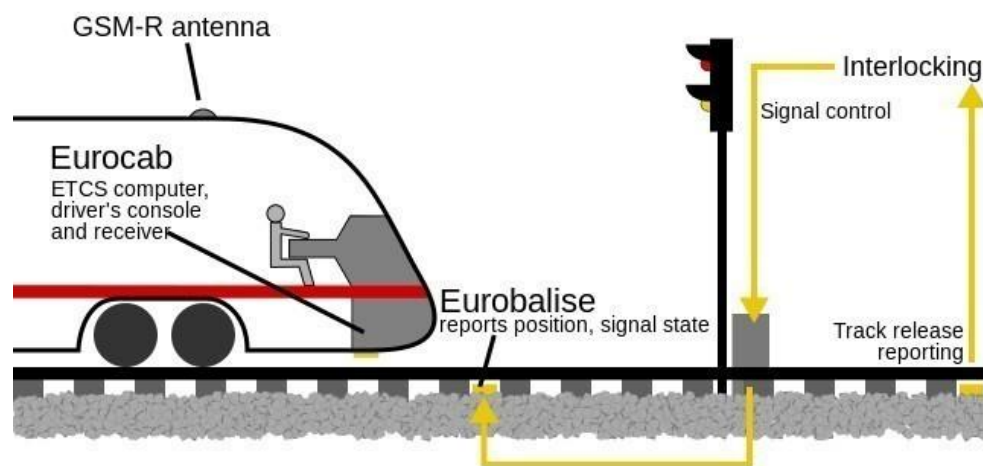


Figura 3- ERTMS L1, illustrazione dei componenti e delle loro relazioni che costituiscono la tecnologia

L'ERTMS Livello 2 è invece, a differenza del Livello 1, un sistema di tipo continuo essendo i vincoli di marcia comunicati al sottosistema di bordo non più tramite boe disposte sul binario ma via radio, attraverso la rete **GSM-R**. Lo scambio di informazioni tra il sottosistema di terra e di bordo avviene grazie al canale radio GSM-R, mentre le boe eurobalise (fisse) svolgono principalmente funzione di riferimenti di posizione. L'architettura del sistema prevede la presenza di un Radio Block Centre (RBC) che riceve in ingresso lo stato di libertà o occupazione delle sezioni di binario davanti al treno e, sulla base di tale stato, calcola e invia al sottosistema di bordo (detto European Vital Computer o EVC), tramite la rete radiomobile GSM-R, i vincoli di marcia da rispettare, come illustrato nella Figura 4.

In questo caso i segnali lungo la linea sono facoltativi e il rilevamento del treno e i controlli di integrità potrebbero essere eseguiti dalle apparecchiature a terra oltre l'ambito dell'ERTMS o gestiti nell'ambito del sistema ERTMS.

Il livello 2 prevede la supervisione continua del movimento del treno con comunicazione costante tramite RMR tra il treno e il binario. Il livello 2 unisce il livello 2 e il livello 3 dell'ETCS.

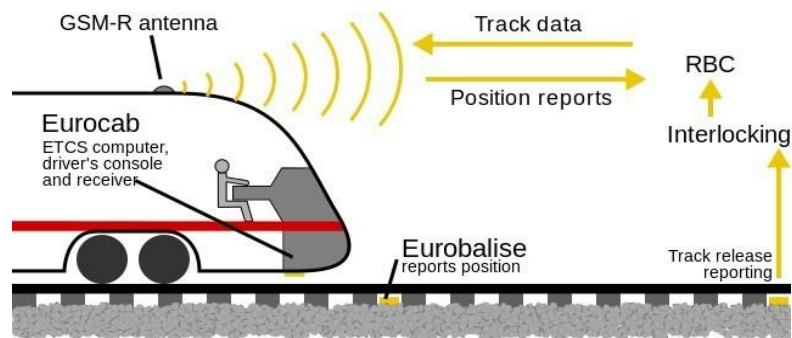


Figura 4- ERTMS L2, illustrazione dei componenti e delle loro relazioni che costituiscono la tecnologia

L'ERTMS Livello 3, infine, ha una architettura sostanzialmente analoga a quella del Livello 2, con la differenza che, mentre nel Livello 2 la lunghezza del tratto di via libera davanti ad un treno viene calcolata sulla base dello stato di occupazione delle sezioni in cui è suddivisa la linea, nel Livello 3 tale lunghezza viene calcolata direttamente sulla base della posizione della coda del treno che precede.

La figura seguente (Figura 5) mostra il caso di localizzazione e integrità del treno gestite nell'ambito del sistema ERTMS, ovvero non sono necessari segnali lungo la linea o sistemi di rilevamento del treno a terra diversi dagli Eurobalise. L'integrità del treno è supervisionata dal treno.

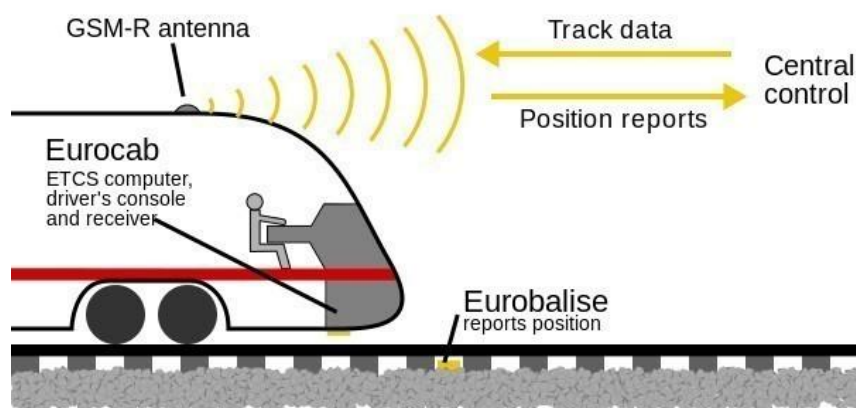


Figura 5- ERTMS L3, illustrazione dei componenti e delle loro relazioni che costituiscono la tecnologia

A questi si aggiungono altri due livelli: **Livello 0**, che si applica ai treni dotati di ETCS circolanti su linee non attrezzate; e il **Livello STM**, destinato ai treni dotati di ETCS che circolano su binari in cui deve essere utilizzato il sistema nazionale preesistente. Per quanto riguarda il livello STM, l'ETCS funge da interfaccia tra il macchinista e l'ATP nazionale (Protezione Automatica Treno).

1.3.1 FRMCS

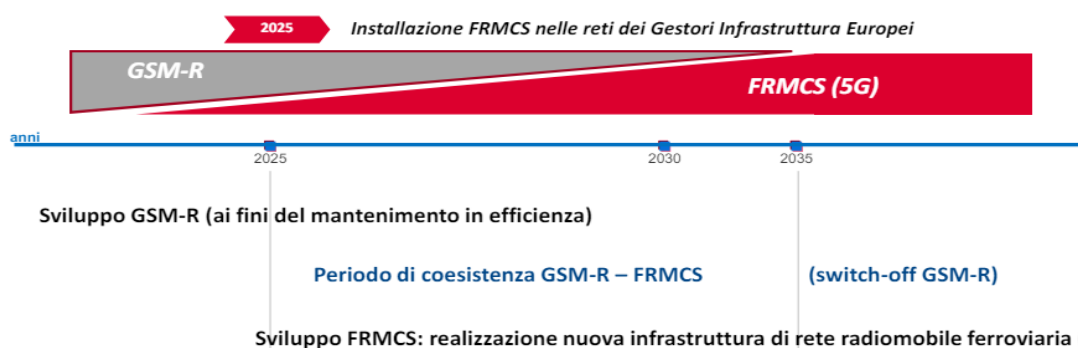


Figura 6- Evoluzione della tecnologia ETCS con sviluppo della infrastruttura di rete da GSM-R a FRMCS

Il GSM-R è lo standard di comunicazione radiomobile adottato al livello trans-europeo dal settore ferroviario per garantire il controllo e le comunicazioni vitali Terra-Treno del sistema di segnalamento ERTMS European Rail Traffic Management System.

Il nuovo standard di comunicazione radiomobile ferroviario interoperabile che andrà a sostituire il GSM-R è denominato FRMCS (Future Railway Mobile Communications System) ed è basato sulla **tecnologia 5G** rispondente agli standard internazionali [6].

La forte spinta alla digitalizzazione che interessa l'infrastruttura ferroviaria nazionale non può prescindere dalla disponibilità di una rete fissa di trasmissione dati ad altissima capacità con prestazioni avanzate e flessibili tale da costituire il "sistema nervoso" per lo scambio delle informazioni e la base sulla quale costruire servizi innovativi.

L'architettura del sistema FRMCS è progettata con l'obiettivo di disaccoppiare lo strato applicativo dallo strato di servizio/trasporto delle comunicazioni. In virtù di tale scelta architetture, la tipologia di rete che sarà utilizzata per trasportare le comunicazioni non influenzerà l'accessibilità al servizio ferroviario erogato, rendendo così possibile in futuro affiancare o integrare la futura rete radiomobile ferroviaria in tecnologia 5G, con reti di operatori pubblici, reti satellitari o reti WiFi.

Il nuovo standard di comunicazione FRMCS rappresenta un vero e proprio cambio di paradigma nel settore delle telecomunicazioni ferroviarie e una grande opportunità in grado di modificare profondamente l'attuale scenario tecnologico.

1.4 ATO

Il sistema **ATO** (Automatic Train Operation) è attualmente utilizzato in alcune linee metropolitane definite tecnicamente ambienti segregati. Invece, le reti ferroviarie sono ambienti aperti e come tali l'ambiente non può essere facilmente controllato (linee suburbane, linee merci, linee ad alta velocità e linee principali a traffico misto). Con le tecnologie esistenti (e quelle utilizzate per le reti segregate) è difficile automatizzare tutte le "funzioni di base". Tuttavia, la funzione di guida può essere automatizzata e l'uso dell'ATO protetto da ATP con un conducente presente (GoA2) sta ora emergendo come un'opzione credibile al di fuori dell'ambiente metropolitano.

Nelle operazioni ferroviarie l'applicazione di base dell'ATP (GoA1) mitiga i rischi fondamentali per la sicurezza associati all'errore umano nell'attività di guida (superamento dei limiti

consentiti). La gestione della complessità della rete richiederà una soluzione ATO più capace [7] e [8].

L'obiettivo è consentire ai treni senza conducente di circolare con l'ETCS, inizialmente a GoA2 e infine raggiungendo un livello di completa automazione (GoA4).

Il sistema ferroviario autonomo deve raccogliere informazioni grezze sullo stato/condizione dell'ambiente digitale e fisico. Ciò si ottiene attraverso due metodi fondamentali:

- Ricevuti da altri sistemi connessi;
- Acquisito direttamente da sensori (es. GPS, RADAR, LiDAR, telecamera IR, stereocamere ecc.).

Hitachi Rail, player globale nel settore ferroviario, ha sviluppato un brevetto per l'utilizzo del sistema ATO sulle linee ferroviarie. Tale sistema è un'importante innovazione tecnologica che aiuterebbe nei casi in cui un ostacolo venga rilevato da una telecamera di monitoraggio o da un sensore, installati in un luogo in cui la visibilità è scarsa sulla ferrovia, ad esempio una curva, una banchina di una stazione o altro.

Sebbene attualmente tale tecnologia sia stata adottata soltanto per linee metropolitane, è possibile visualizzare i componenti, che potrebbero essere utilizzati per le linee aperte, dalla Figura 7:

-una telecamera di monitoraggio installata a terra e/o su un veicolo che cattura un'immagine del binario su cui viaggia il treno;

-un dispositivo di terra che include: un dispositivo di rilevamento degli ostacoli che raccoglie il video catturato dalla telecamera di monitoraggio e rileva la presenza o l'assenza di un ostacolo. è un dispositivo senza fili terrestre che trasmette, qualsiasi informazione del video e informazioni sulla posizione, al dispositivo di bordo.

-un dispositivo di bordo include: un dispositivo wireless di bordo che riceve le informazioni del video della telecamera, il risultato del rilevamento dell'ostacolo e le informazioni sulla sua posizione.

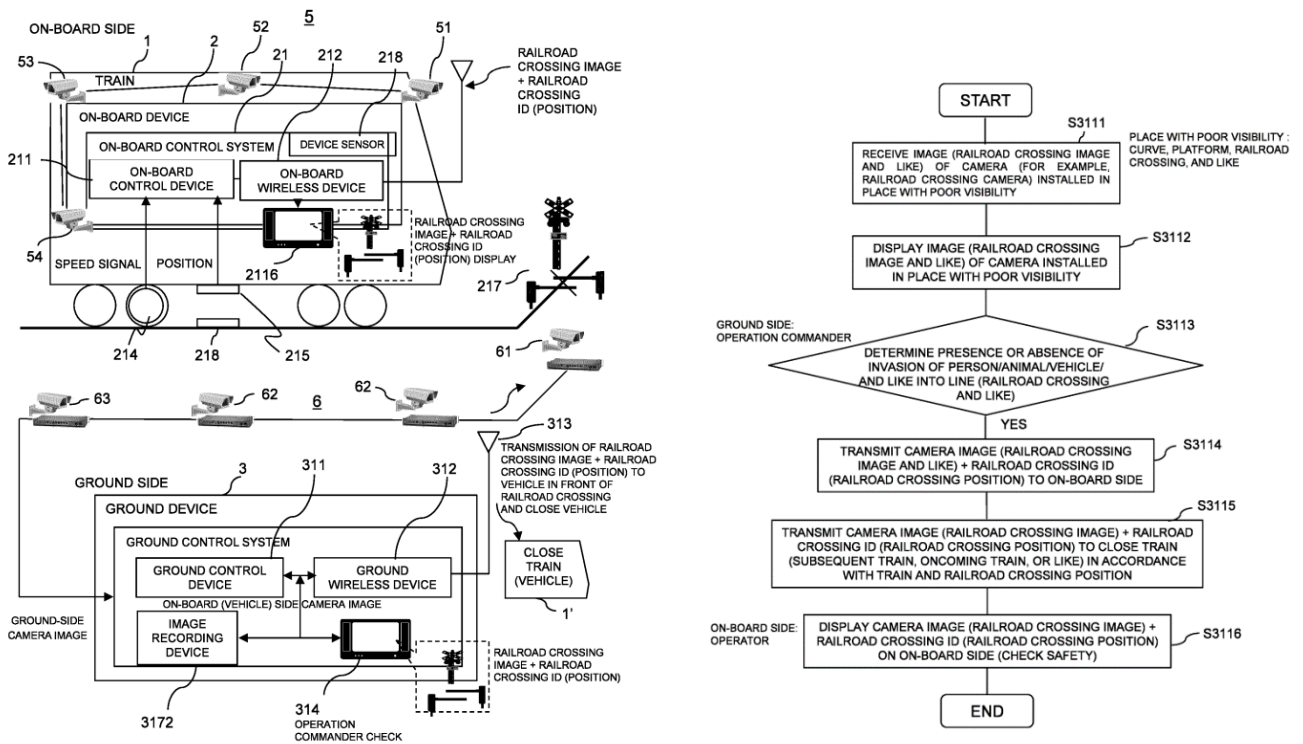


Figura 7- Brevetto Hitachi 27.07.2022 Bollettino 2022/30

1.5 CBTC

Un altro sistema di segnalamento ferroviario è il Controllo dei Treni Basato sulla Comunicazione (CBTC- Communication Based Train Control). Utilizza tecnologie di comunicazione wireless per migliorare l'efficienza e la sicurezza delle operazioni ferroviarie.

Tale sistema è attualmente utilizzato per le metropolitane ma può essere considerato come base per l'utilizzo futuro del sistema ATO sulle linee ferroviarie.

In un sistema CBTC, ogni treno è dotato di un **transponder** che si collega alle apparecchiature lungo il percorso, che comprendono una serie di **antenne o fari** posizionati lungo il binario, per comunicare. Il transponder trasmette e riceve informazioni sulla posizione, la velocità e altri aspetti operativi del treno, consentendo alle apparecchiature lungo la strada di controllare con precisione i movimenti. Il CBTC non misura l'occupazione dei binari con le apparecchiature nel binario, ma i treni stessi segnalano continuamente la loro posizione ai sistemi di sicurezza

sul binario e / o ad un posto centrale di controllo del traffico. Ciò consente ai veicoli su rotaia di susseguirsi quasi allo spazio di frenata. Questo metodo di protezione viene talvolta definito "protezione con blocchi scorrevoli" o "protezione con blocchi mobili".

Ha vari gradi di automazione, il GoA1 (manuale) che richiede un'azione costante da parte del conducente, il GoA2 (semiautomatico) in cui vi è una prestazione parziale del conducente, il GoA3, senza la presenza di un conducente, ma con un assistente a bordo che aiuti a contenere possibili contingenze e GoA4, che è la modalità operativa completamente automatica. In questo senso, il CBTC è un alleato operativo molto importante, classificato come **base tecnologica per ottenere la completa automazione del sistema ferroviario**.

I sistemi CBTC includono:

- segnalazione in cabina: questo elemento comunica autorizzazioni o ordini di guida ai treni
- influenza del treno: questa parte garantisce che un treno aderisca sempre al limite di velocità e non vada mai oltre il punto in cui è stato dato un permesso o un ordine di guida
- controllo automatico del treno ATO: i treni con ATO viaggiano senza conducente o macchinista.

1.6 ERSAT

L'obiettivo principale di **ERSAT EAV** è verificare l'idoneità dell'EGNSS (compresi i servizi iniziali EGNOS e Galileo) per applicazioni ferroviarie di sicurezza basate su tecnologie satellitari. Il sistema di controllo/protezione dei treni basato su EGNSS-ERTMS risulta particolarmente vantaggioso in termini di costi operativi rispetto ad altre soluzioni di potenziamento delle infrastrutture locali/regionali, considerando il rapporto beneficio/costo medio e un notevole incremento della sicurezza [9].

La tecnologia più recente in fase di studio è **ERSAT GGC**, concepita per velocizzare il processo di certificazione degli asset EGNSS secondo le regole ERTMS. Si tratta del seguito del programma ERSAT (ERTms + SATellite) lanciato nel 2012 da RFI in collaborazione con Ansaldo STS per l'integrazione delle tecnologie satellitari sulla piattaforma ERTMS. ERSAT

GGC farà affidamento sui risultati dei più importanti progetti finanziati dalla CE e GSA come NGTC, ERSAT EAV, STARS. Sfrutterà un banco di prova pienamente operativo situato in Sardegna sulla linea a doppio binario di 50 km tra Cagliari e San Gavino.

La **tecnologia ERSAT** si basa sulla **ricezione via satellite della localizzazione dei treni (posizione e velocità)**, mentre l'**ERTMS supervisiona la situazione del traffico ferroviario**.

È possibile visualizzare le relazioni tra componenti della tecnologia con la Figura 8. I dati e le informazioni (che generano un dialogo terra/treno) sono trasmessi ai dispositivi installati a bordo dei convogli dalle radio base posizionate ogni 7 chilometri, invece che dalla boa o transponder installati lungo il tracciato ferroviario ogni 1,3 chilometri. Il sistema permetterà un incremento della capacità di traffico a disposizione delle imprese ferroviarie perché aumenta il numero dei convogli che possono circolare in sicurezza nella sezione di linea controllata.

L'utilizzo della tecnologia satellitare permette:

- Un monitoraggio reale e affidabile della velocità e distanza in base alla posizione del treno sulla linea.
- Riduzione dei costi di attrezzaggio di una linea con sistema ERTMS

La tecnologia ERSAT si basa sul sistema ERTMS, apportando modifiche migliorative. La presenza di **balise virtuali** garantisce maggior affidabilità eliminando gli errori legati alle balise fisiche. Inoltre, l'integrazione del satellite rende più preciso il **monitoraggio della velocità** nelle condizioni in cui c'è bassa aderenza tra binario e ruota, e risolve problemi dovuti alla debolezza dell'interazione terra- bordo basate sullo standard GSM-R sostituendolo con **reti mobili 4G/5G, Wi-Fi e Satellite** in modo da entrare e uscire dalla copertura senza interrompere la connessione end to end (Figura 9).

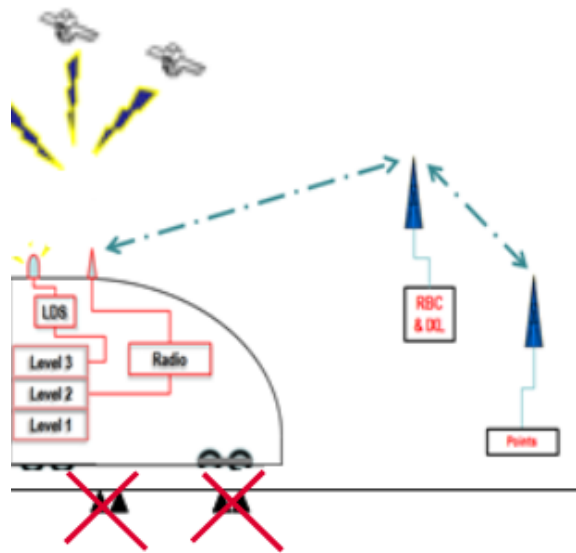


Figure 8- Tecnologia ERSAT, illustrazione dei componenti e delle loro relazioni che costituiscono la tecnologia

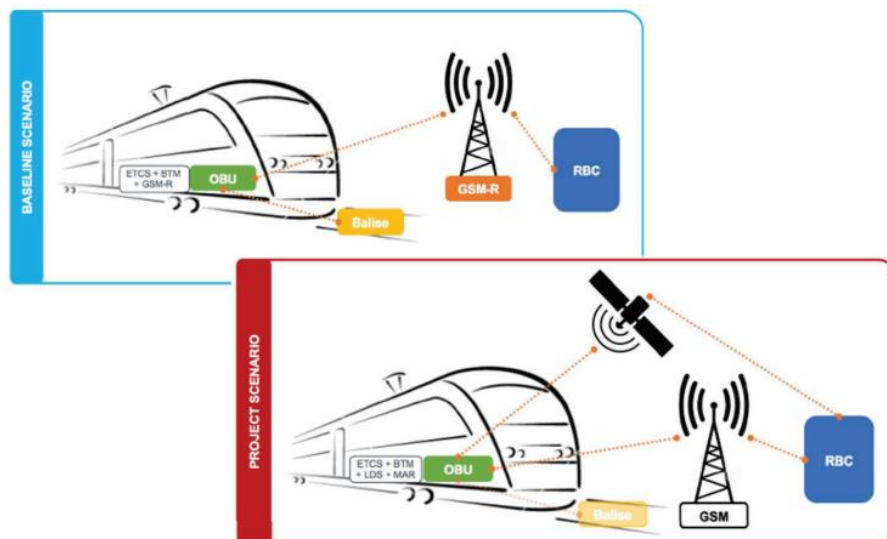


Figura 9- confronto tra tecnologie ERSAT e ERTMS

CAPITOLO II

Modelli e strumenti analitici per definire il Dominant Design

2.0 Modello Lineare dei Processi Innovativi

Il modello lineare dell'innovazione descrive il processo innovativo delle tecnologie suddividendolo in fasi.

Partendo dalla *basic research*, passa attraverso l'*applied research*, segue la fase *pre-competitive* che tipicamente si esplicita in *experiment development*, per arrivare nella fase competitiva che vede sviluppare la tecnologia come principale protagonista.

Ciascuna fase è collegata ma ben distinta:

- **RICERCA DI BASE:** a valle di questa fase c'è la scoperta. Necessita di competenze estremamente specifiche. È una fase nella quale la ricerca è considerata bene pubblico e per questo deve essere disseminata e non protetta. Per passare da questa fase alla successiva serve la multidisciplinarietà.
- **RICERCA APPLICATA:** in questa fase si applica la ricerca di base ad un problema specifico ed il risultato è mostrato con l'inserimento della tecnologia nel mercato.
- **FASE PRE-COMPETITIVA:** ogni azienda fa attività di ricerca e sviluppo (R&D) in modo da mantenere la propria conoscenza ed esplorarne nuova.
- **FASE COMPETITIVA:** in questa fase si sviluppa il prodotto, partendo dal prototipo, facendo i miglioramenti opportuni per poi progettare nel dettaglio.

Gli attori operanti nel modello sono due e sono:

- **PUBBLICI:** Università, Istituzioni e Governi. Il pubblico fa ricerca multidisciplinare e ha come obiettivo quello di diffondere la conoscenza.
- **PRIVATI:** Imprese. I privati non investono nella ricerca perché nelle fasi embrionali non si ha la certezza che la tecnologia sia redditizia. La conoscenza in questo caso viene protetta per avere vantaggio competitivo sugli altri e quindi fare profitto.

Il Pubblico opera nelle aree della *basic research*, *applied research* e fase *pre-competitive*, quindi osservando la Figura 10 si estende nella parte sinistra e, spostandosi verso destra, si riduce l'impegno arrivando a zero nella fase competitiva. In quest'ultima fase i tassi di rischio e di fallimento sono più alti. A destra, i privati agiscono nella fase competitiva e, spostandosi verso sinistra, il loro impegno si riduce fino ad arrivare a zero nella fase di *basic research*.

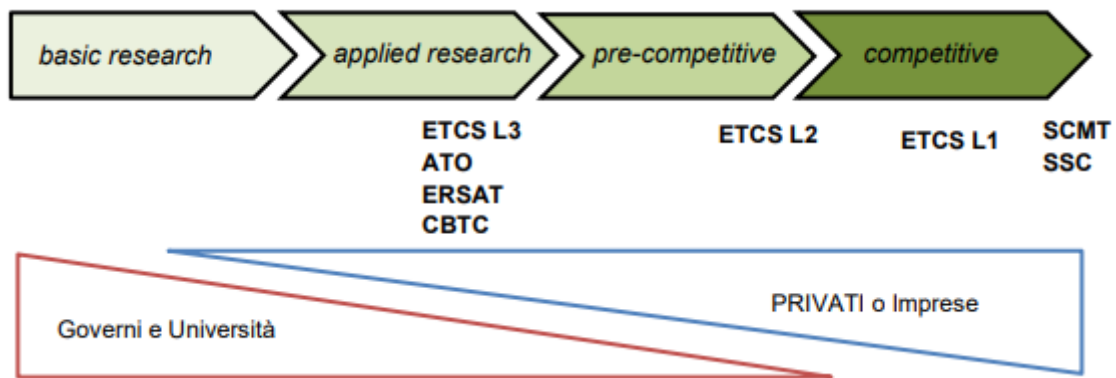


Figura 10- Modello lineare dell'innovazione per le tecnologie del segnalamento ferroviario

Nella fase di *applied research* l'obiettivo è quello di fare studi sulla tecnologia per immetterla nel mercato in seguito. Le nuove tecnologie del segnalamento ferroviario sono in una fase di analisi e studio. Queste sono: ATO GoA4, CBTC per linee aperte, ERSAT ed ETCS L3.

Bisogna precisare che, alcune di queste tecnologie come la tecnologia CBTC o ATO sono già utilizzate sulle linee metropolitane. L'obiettivo è quello di estendere alcune caratteristiche della tecnologia CBTC alla linea aperta sfruttando tale opportunità per avvicinarsi alla tecnologia ATO GoA4, andando incontro ad una totale automazione della tecnologia che in futuro non vedrà la presenza del *driver*, come adesso è possibile per alcune linee metropolitane.

La tecnologia ETCS L3 porterebbe grandi vantaggi al segnalamento ferroviario. Attualmente sono pochi gli studi fatti su questa tecnologia, dal momento che il mercato è in una fase di transizione dall'ETCS L1 all'ETCS L2 che ha catturato l'attenzione di numerose aziende del settore.

La fase pre-competitiva può anche essere definita di "*product development*". L'obiettivo delle aziende è quello di continuare la ricerca in una tecnologia a loro nota per rafforzare la conoscenza ed esplorare sviluppi futuri. In questa fase si trova la tecnologia ETCS L2. Le imprese leader e non che già si occupano di segnalamento ferroviario con la tecnologia ETCS L1, stanno migrando verso la tecnologia ETCS L2. Per garantire un supporto alla ricerca e sviluppo della tecnologia ETCS L2 le imprese incumbent del settore si affidano a startup in diverse aree al fine di creare una tecnologia innovativa.

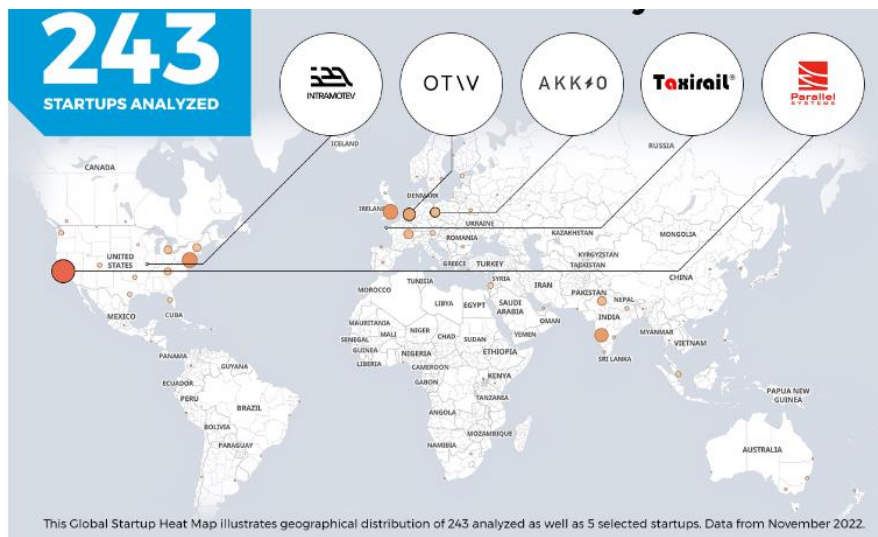


Figura 11- Mappa globale relativa alle Startup che fino al 2022 hanno sviluppato tecnologie innovative relative all'Autonomous Train System (ATS) per sostenere le imprese leader nel settore

La fase competitiva è quella di “diffusione”. In questa fase si trova la tecnologia ETCS L1 che corrisponde alla prima tecnologia richiesta dall’Unione Europea al fine di garantire l’interoperabilità. Nonostante sia la tecnologia comune tra i Paesi che si estende per più chilometri di linea, le imprese leader continuano ad apportare miglioramenti.

Alla fine della fase di diffusione, si collocano le tecnologie tradizionali di ogni Paese che, nel caso studiato, sono quelle presenti sul territorio italiano, quali SCMT ed SSC. In questo caso le tecnologie sono largamente diffuse, non ci sono studi o investimenti in ricerca e sviluppo poiché il sistema ferroviario si limita prevalentemente a operazioni di manutenzione perché l’interesse attuale da parte delle aziende del settore e dell’Unione europea è rivolto alla tecnologia ETCS.

2.1 Modello di Henderson e Clark

Dopo aver studiato le tecnologie del segnalamento ferroviario nei loro componenti e specifiche, si può procedere con l’analisi del tipo di innovazione attraverso il Modello di Henderson e Clark.

Per definizione, un’**innovazione è architetturale** se ha effetto sull’architettura di un prodotto o servizio, mentre si dice **innovazione di componente** se riguarda il componente di un prodotto o servizio.

Un'architettura di un sistema (prodotti o servizi) è l'insieme dei componenti del sistema e delle relazioni tra di essi.

La bill of material di una tecnologia serve per rappresentare l'architettura di un sistema, perché definisce i componenti. È utile rappresentare i **diagrammi a blocchi** delle tecnologie al fine di rappresentare non solo i componenti e i loro legami fisici ma anche semplici legami per scambio di informazioni/elettricità... e legami per vicinanza spaziale.

Le architetture non sono tutte uguali. Esistono architetture più integrate e architetture meno integrate.

Un'architettura è integrata quando le relazioni tra componenti sono tali da non distinguere i componenti tra loro. Un'architettura è non integrata quando posso disassemblare o distinguere facilmente i componenti dell'architettura.

Per le tecnologie del segnalamento ferroviario analizzate, l'architettura del veicolo può essere disassemblata in più parti o modulare, quindi, in tutti i casi, si tratta di **architetture non integrate**.

Partendo da una visione più chiara e semplificata delle tecnologie attraverso i **diagrammi a blocchi**, è possibile identificare quattro tipi di innovazioni. Per classificare le tecnologie nelle quattro innovazioni bisogna valutare due aspetti: le relazioni architettoniche tra componenti e i riferimenti tecnologici, che possono cambiare o no. Di seguito, la Figura 12 mostra una rappresentazione teorica della matrice del modello di Henderson e Clark

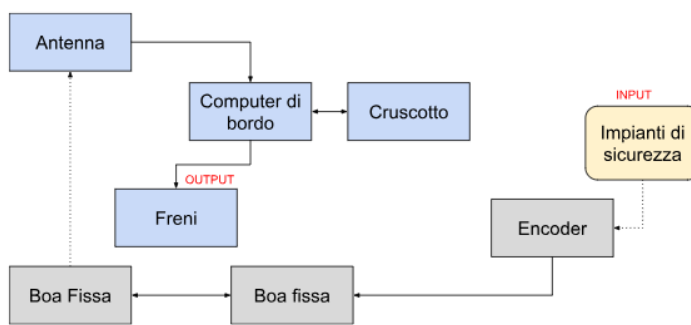
Relazioni tra componenti	Non cambiare	Modifica
Riferimento tecnologie		
Modifica	Innovazione modulare (es. alta capacità batterie in cella telefoni)	Innovazione radicale (es. PC vs macchine da scrivere)
Non cambiare	Incrementale innovazione (es. rotazione più veloce dischi fissi)	Architettonico innovazione (es. ruota posteriore vs auto a trazione anteriore)

Figura 12- Matrice del modello di Henderson e Clark

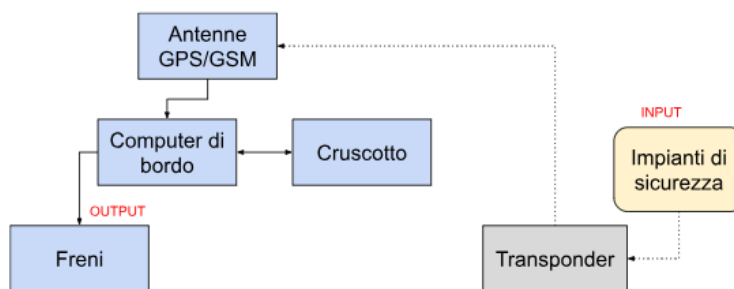
Di seguito sono elencate le caratteristiche di ciascuna innovazione, al fine di poter catalogare le tecnologie del segnalamento ferroviario nel modo più opportuno:

-Innovazione incrementale: non cambiano né la tecnologia sottostante, né l'architettura del prodotto. Questo tipo di innovazione può essere costoso da realizzare, in termini di sforzo, ma non è difficile da gestire, poiché replica completamente l'esperienza acquisita con i prodotti precedenti.

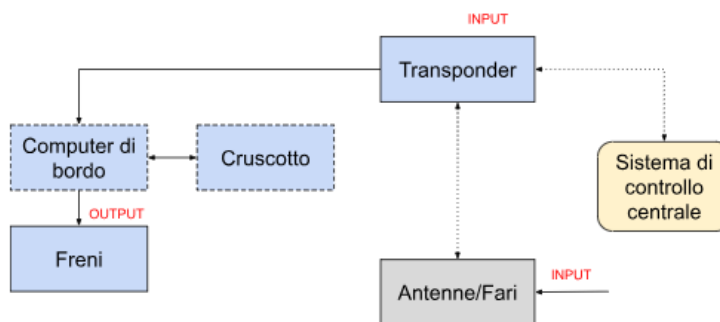
In questa tipologia di innovazione rientrano le tecnologie tradizionali attualmente più diffuse quali SSC, SCMT, CBTC. Sono un punto di partenza per le tecnologie future, ottenute attraverso modifiche architettoniche e/o tecnologiche.



(tecnologia SCMT)



(tecnologia SSC)



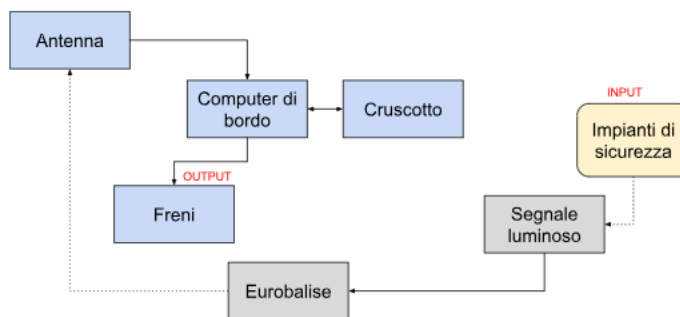
(tecnologia CBTC)

Relazione tra componenti Tecnologie	NOT CHANGE	CHANGE
CHANGE	Innovazione modulare	Innovazione radicale
NOT CHANGE	Innovazione incrementale	Innovazione architettonica

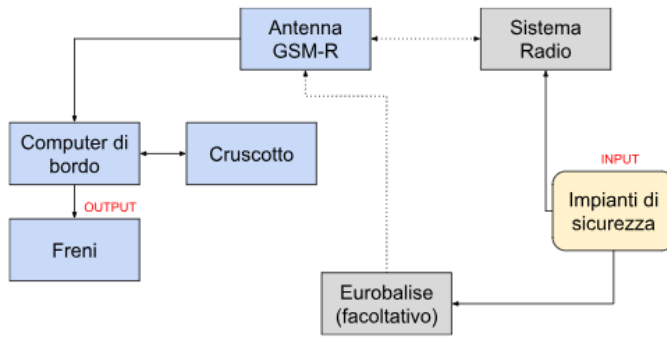
Tabella 1- Diagrammi a blocchi e matrice di Henderson e Clark per le tecnologie SCMT, SSC, CBTC

- **Innovazione modulare:** la tecnologia sottostante cambia in uno o più elementi funzionali, ma non cambia l'architettura del prodotto. In questo caso, l'innovazione nei moduli interessati può essere significativa e difficile da perseguire, poiché le competenze utilizzate per tecnologie precedenti devono essere modificate. Tuttavia, i problemi saranno limitati ai moduli interessati e lo sviluppo del prodotto completo sarà quindi relativamente facile da gestire.

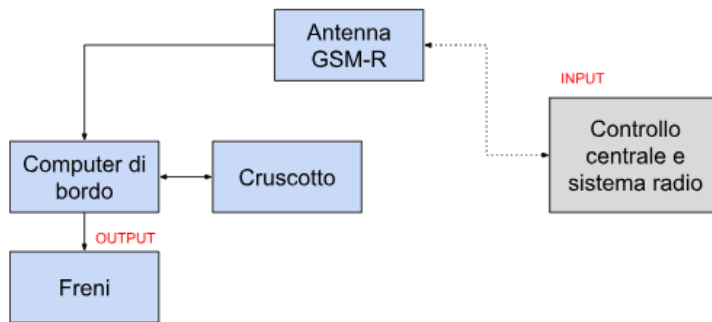
La riduzione dei componenti delle tecnologie del segnalamento ferroviario, cresce gradualmente con l'evoluzione del sistema ETCS. La caratteristica principale dell'ETCS L2 ed in futuro dell'ETCS L3 è quella di eliminare il sistema di terra sostituendolo con lo scambio di informazione via rete internet e radio.



(tecnologia ETCS L1)



(tecnologia ETCS L2)



(tecnologia ETCS L3)

Tecnologie / Relazione tra componenti	NOT CHANGE	CHANGE
	CHANGE	Innovazione modulare
NOT CHANGE	Innovazione incrementale	Innovazione architettonica

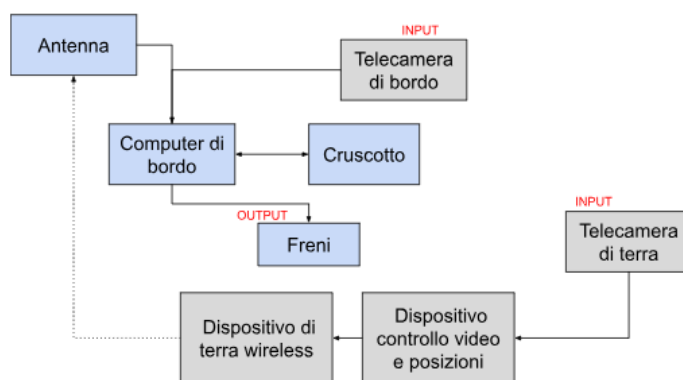
Tabella 2- Diagrammi a blocchi e matrice di Henderson e Clark per le tecnologie ETCS L1, L2 e L3

- **Innovazione architettonica:** la tecnologia sottostante non cambia, ma cambiano le relazioni tra componenti. L'innovazione architettonica è generalmente difficile da gestire, poiché le routine organizzative che consentono lo sviluppo di un prodotto coerente, non sono immediatamente disponibili, ma richiedono del tempo (e probabilmente anche alcuni errori costosi) per svilupparsi. Ciò è particolarmente vero se il nuovo modello di relazioni tra i

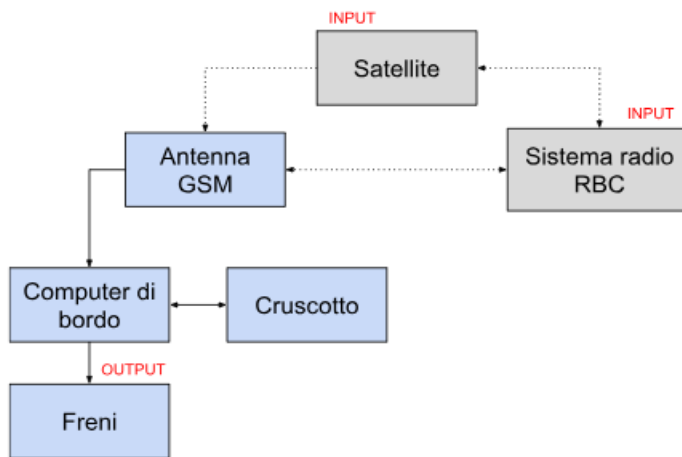
componenti è noto ex ante. In alcuni casi, l'innovazione architettonica può cogliere le aziende "di sorpresa" perché innovazioni apparentemente minori modificano inaspettatamente le relazioni tra i componenti.

- **Innovazione radicale:** cambiano sia la tecnologia sottostante che l'architettura del prodotto (ad esempio, una casa automobilistica che passa da un veicolo tradizionale a un'auto elettrica). Questo tipo di innovazione è la più difficile da perseguire, anche se non è molto comune. Quando si tratta di innovazione radicale, le aziende sono spesso così diffidenti nei confronti del cambiamento architettonico che cercano di trattarlo come modulare, modificando i sottosistemi di prodotto uno per uno, ma cercando di evitare di alterare le loro relazioni reciproche. Questa esitazione nell'abbracciare l'innovazione radicale apre opportunità interessanti per le aziende che, invece di apportare modifiche frammentarie all'architettura esistente, accettano la sfida di modificare congiuntamente la tecnologia e l'architettura del prodotto.

Ad oggi, le tecnologie più innovative sono la tecnologia ATO e la tecnologia ERSAT. Entrambe presentano grandi cambiamenti architettonici e tecnologici nella struttura. La tecnologia ATO si compone di telecamere di terra e di bordo e dispositivi video. La tecnologia ERSAT si interfaccia con sistemi radio e satelliti da cui raccoglie informazioni dettagliate sulla condizione della linea ferroviaria.



(tecnologia ATO)



(tecnologia ERSAT)

Relazione tra componenti Tecnologie	NOT CHANGE	CHANGE
CHANGE	Innovazione modulare	Innovazione radicale
NOT CHANGE	Innovazione incrementale	Innovazione architettonica

Tabella 3– Diagrammi a blocchi e matrice di Henderson e Clark per le tecnologie ATO ed ERSAT

2.2 Gli Indicatori di Performance

L'innovazione tecnologica può essere di tipo “**technology push**” o “**demand pull**”. La prima, si verifica quando uno sviluppo tecnologico è generato indipendentemente da una specifica esigenza di mercato e viene infine implementato in un determinato settore, soddisfacendo così una domanda latente. Al contrario, l'innovazione “**demand pull**” è trainata dalla domanda, ovvero, le imprese osservano la domanda di prodotti migliorati, che proviene dal mercato e dalla società in generale, e dirigono esplicitamente lo sviluppo della tecnologia per rispondere alle esigenze di mercato.

Il progresso tecnologico è studiato attraverso gli indicatori di performance in funzione del tempo (es. anni) attraverso le curve ad S, che sono uno strumento fondamentale per chi si occupa di innovazione.

Per la costruzione delle curve ad S, è necessario scegliere un indicatore di performance, come variabile dipendente, che rappresenti il progresso tecnologico, ma soprattutto che sia rappresentativo dei bisogni degli utenti più difficili da identificare e variabili nel tempo. In secondo luogo, utilizzare il tempo come variabile indipendente può essere fuorviante, poiché la tecnologia non migliora automaticamente con lo scorrere del tempo, ma migliora per l'investimento e lo sforzo che le aziende vi dedicano. Pertanto, le curve a S non dovrebbero essere realmente tracciate in funzione del tempo, ma della spesa cumulativa in R&D a livello di settore. L'utilizzo di questa variabile implica che i miglioramenti tecnologici si verificano perché le imprese si imitano a vicenda e quindi si basano sugli investimenti reciproci.

Le curve a S mostrano che, quando emerge una tecnologia, le prestazioni sono generalmente piuttosto basse, fino a quando non viene raggiunto un grado sufficiente di maturità. A questo punto, le prestazioni iniziano a crescere a una velocità significativa, fino a raggiungere infine un **limite tecnologico**, ovvero un livello prestazionale che non può essere superato a causa di limitazioni intrinseche alla tecnologia. Una volta raggiunto il limite, le aziende che vogliono migliorare i propri prodotti dovranno abbracciare nuove soluzioni tecniche. In tal modo, le aziende devono scegliere tra una serie di nuove tecnologie candidate disponibili e decidere quando farlo. Soltanto una tecnologia generalmente si dimostrerà idonea ed emergerà.

Può capitare che una nuova tecnologia si presenti sul mercato con performance inferiori rispetto alla tecnologia esistente. Questo è normale per un certo periodo di tempo e di investimento in ricerca e sviluppo. Quando la nuova traiettoria tecnologica raggiunge performance paragonabili a quelle precedenti, c'è lo scambio e la nuova traiettoria tecnologica diventa dominante. Le tecnologie analizzate sono tra loro CONCORRENTI.

La ricerca condotta, al fine di analizzare il progresso delle tecnologie del segnalamento ferroviario, si è basata su dati relativi alle linee ferroviarie Italiane ed Europee. Dopo aver cercato ed analizzato tutte le tecnologie, di cui ad oggi, alcune concretamente utilizzate, altre ancora in fase di studio e testing, è importante identificare e valutare gli indicatori di performance.

L'obiettivo principale, nello studio degli indicatori di performance, è quello di capire, dopo aver analizzato le caratteristiche principali tecniche e non di ciascuna tecnologia e aver selezionato quelle in comune tra tutte, come le tecnologie attualmente diffuse si evolvono, in che momento

del loro ciclo di vita si trovano sulle curve ad S, quali tecnologie stanno emergendo e stanno cominciando ad affermarsi, quali, invece, ancora non emergono.

L'analisi seguente si concentra su due indicatori di performance per le tecnologie del segnalamento ferroviario, identificati sulla base delle richieste e degli obiettivi posti dall'Unione Europea:

$$1) \frac{\text{kilometro}}{\text{Euro investiti}} = \left[\frac{\text{km}}{\text{M€}} \right]$$

$$2) \frac{\text{capacità della linea}}{\text{velocità} \times \text{tempi risposta segnale} \times \text{distanza frenata}} = \left[\frac{\frac{\text{n.treni}}{\text{h}}}{\frac{\text{km}}{\text{h}} \times \text{sec} \times \text{m}} \right]$$

Il primo indicatore è relativo a quanti chilometri (km) di linea sono stati realizzati e utilizzano una determinata tecnologia del segnalamento, in Italia ed in Europa, rapportati agli investimenti in milioni di Euro (M€) negli anni. Gli investimenti sono un indicatore chiaro del punto in cui si trova la tecnologia lungo le curve ad S. È chiaro che una spinta negli investimenti corrisponde ad un grande interesse nella specifica tecnologia, mentre un calo degli investimenti, corrisponde ad una tecnologia ormai matura e di scarso interesse.

Sono stati raccolti dati in termini di chilometri di linee in Europa e investimenti per la loro realizzazione in Milioni di Euro, in documenti pubblicati dalle imprese ferroviarie o dall'Unione Europea, per ciascuna tecnologia precedentemente studiata [10] e [11].

È importante specificare che non c'è una tecnologia di partenza comune in tutto il territorio europeo. Per questo motivo, l'analisi seguente assume come tecnologie di base quelle presenti sul territorio italiano, ovvero la tecnologia SCMT ed SSC, che comunque hanno caratteristiche analoghe alle tecnologie attualmente utilizzate nella maggior parte dei Paesi europei. Ad oggi, il territorio italiano presenta linee ferroviarie per lo più operanti con la tecnologia SCMT. I dati analizzati per le tecnologie SCMT ed SSC sono stati raccolti dai documenti "Relazioni finanziarie annuali" dal 2011 al 2023, e sono elencati nella tabella seguente.

Anno	[km]	
	SCMT	SSC
2011	11778	
2012	11806	
2013	11848	4273
2014	11853	4242
2015	11874	4213
2016	12083	4014
2017	12210	3892
2018	12273	3831
2019	12493	3561
2020	12653	3325
2021	13109	2870
2022	13324	2539
2023	13224	2312

Tabella 4- Estensione in [km] delle linee con tecnologie SCMT ed SSC negli anni

Per entrambe le tecnologie, si è in una fase di declino dal momento che c'è una riduzione degli investimenti, oltre che un affiancamento o completa sostituzione della tecnologia SSC ed SCMT con la tecnologia ERTMS/ETCS. Quindi, l'andamento è dovuto alle operazioni di dismissione di tali tecnologie e sostituzione con le tecnologie come mostrato in Figura 13. Tale operazione è richiesta dall'Unione Europea al fine di creare un sistema unico europeo per garantire una perfetta interoperabilità. I pochi investimenti fatti oggi, sono relativi alle sole operazioni manutentive dei sistemi presenti e all'implementazione della tecnologia SCMT con l'ERTMS, laddove al momento non è possibile la completa sostituzione.

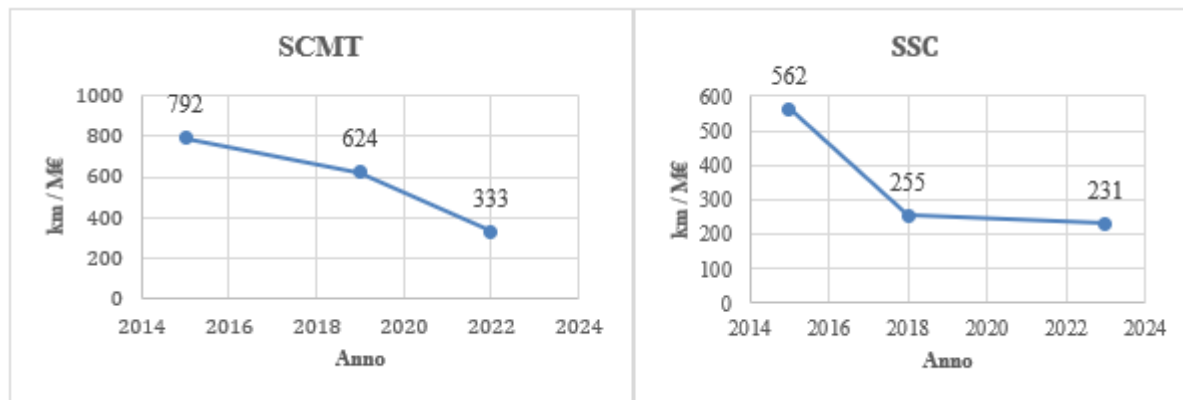


Figura 13- Andamento delle curve a S relative all'indicatore di performance [km/M€] per le tecnologie SCMT ed SSC in funzione del tempo [Anno]

Per contribuire alla creazione di uno spazio ferroviario europeo unico, alla fine degli anni Ottanta e inizi anni Novanta, l'industria ferroviaria europea ha avviato lo sviluppo di un sistema europeo di controllo, comando, segnalamento e comunicazione (l'ERTMS) e la Commissione europea ne ha sostenuto l'introduzione come unico sistema in Europa. L'obiettivo dell'ERTMS è sostituire tutti i sistemi di segnalamento esistenti in Europa con un sistema unico, così da promuovere l'interoperabilità delle reti ferroviarie nazionali e il trasporto ferroviario transfrontaliero.

La prima tecnologia analizzata appartenente al programma per l'interoperabilità europea è l'ETCS L1 che vede le sue prime applicazioni ed investimenti nel 2005, come mostrato nel grafico a sinistra della Figura 14. La riduzione della curva in alcuni punti è dovuta alla difficoltà che hanno riscontrato alcuni Paesi dell'UE nell'adozione. Infatti, l'adozione della tecnologia ERTMS L1 non incontra difficoltà meramente legate ai costi per l'acquisto e installazione di materiali, ma anche legate ai lavori per migrare da un sistema di segnalamento all'altro e al rifiuto da parte di Paesi come la Germania di rinnovare un sistema di segnalamento presente nel Paese già forte, come verrà studiato nell'analisi PEST dei paragrafi successivi.

È evidente come sia in forte crescita l'adozione e l'attenzione posta nella tecnologia ETCS L2. Presente in poche linee europee, nella prima fase tra 2010 e 2020, è stata oggetto di studi e test. Oggi è il fulcro principale degli studi, investimenti ed applicazioni delle aziende del mercato del segnalamento e la crescita della curva è dovuta ad una prima diffusione nei Paesi europei,

per questo dal grafico a destra della figura 14 è presente un tratto che mostra la repentina crescita nell'adozione.

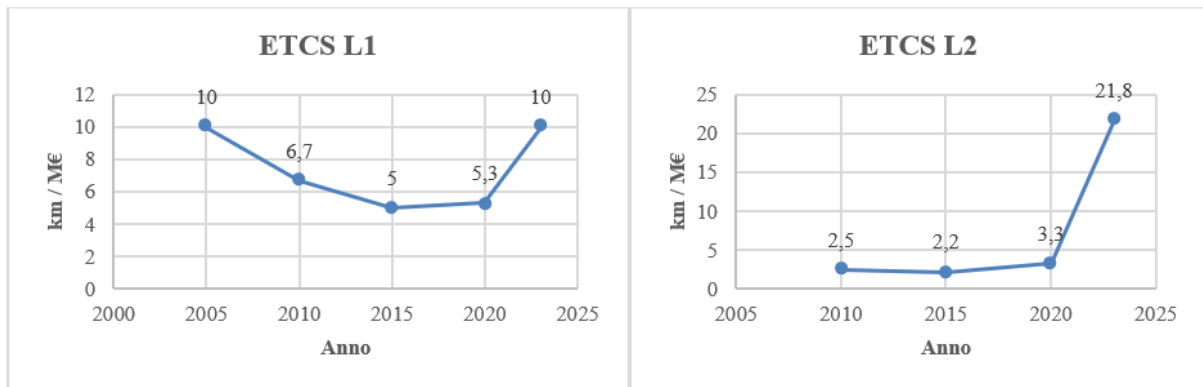


Figura 14- Andamento delle curve a S relative all'indicatore di performance [km/M€] per le tecnologie ETCS L1 ed ETCS L2 in funzione del tempo [Anno]

Le tecnologie ETCS L3, ERSAT e CBTC sono rappresentate da un solo punto in corrispondenza dell'anno e dell'indicatore km/M€, perché ancora in fase di studio o comunque concentrate in una piccola area per operazioni di testing, come è rappresentato nei grafici in Figura 15. Nello specifico, la tecnologia CBTC è oggi quella più utilizzata per le linee metropolitane, sebbene si stia cominciando a studiare come estendere tale tecnologia negli ambienti aperti, termine utilizzato per indicare le linee suburbane e regionali. Tale tecnologia è analoga al sistema ATO GoA2.

La tecnologia ERSAT è presente in Italia su una linea in Sardegna (linea Cagliari – San Gavino) che è stata utilizzata per le operazioni di testing e la linea Novara – Rho che corrisponde alla prima applicazione in servizio.

La curva ad S per la tecnologia ATO evidenzia la situazione della tecnologia GoA4, ovvero il sistema che permette il movimento del treno e i relativi dispositivi di sicurezza e segnalamento funzionanti in assenza del macchinista. Ha un andamento crescente, sebbene i valori dell'indicatore di performance siano ancora molto bassi. La tecnologia ATO comprende più tecnologie tra cui anche quelle che richiedono la presenza del macchinista, ma per semplicità in seguito si utilizzerà il termine semplificato "ATO" per indicare la tecnologia GoA4.

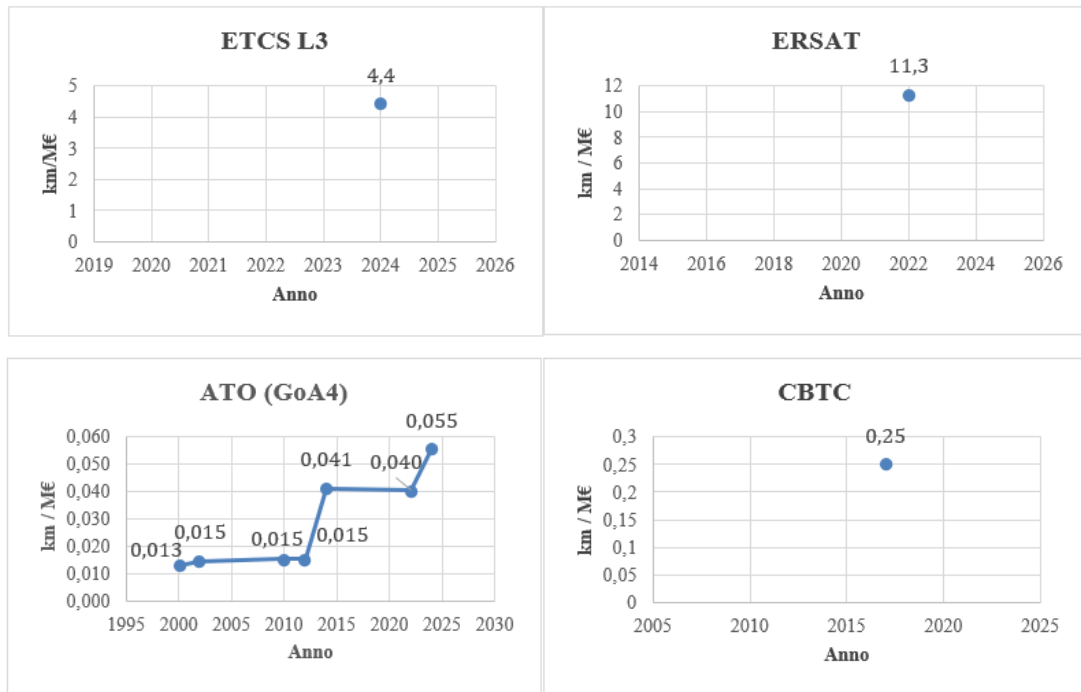


Figura 15- Andamento delle curve ad S relative all'indicatore di performance [km/ M€] per le tecnologie ETCS L3, ERSAT, ATO- GoA4, CBTC in funzione del tempo [Anno]

Dopo aver valutato la tecnologia corrente e aver valutato il punto di maturità, si valutano le tecnologie alternative poste a confronto nello stesso grafico.

Bisogna porre l'attenzione sul fatto che tali tecnologie non hanno una rapida diffusione a causa dei costi di investimento e delle politiche di ogni Paese. Questo, permette di comprendere meglio il motivo per cui l'adozione sia più lenta.

Nel grafico di confronto, in Figura 16, tra le curve degli investimenti in Milioni di Euro [M€], sono state poste le curve delle tecnologie tradizionali SCMT e SSC, con le tecnologie emergenti ETCS. Sebbene le tecnologie tradizionali al momento siano le più diffuse, è evidente un drastico calo degli investimenti di entrambe dovuto alla riduzione dell'interesse in queste due tecnologie dovuto alla spinta da parte dell'Unione Europea verso tecnologie che garantiscano l'interoperabilità. Allo stesso tempo, la crescita delle curve ETCS L1 e L2 non è rapida perché l'adattamento di queste tecnologie, considerando una situazione in larga scala e con costi di realizzazione elevati, richiede molto tempo (anni) per essere compresa, accettata e adottata. Infatti, nel grafico le curve dell'ETCS sono molto basse rispetto alle curve tradizionali.

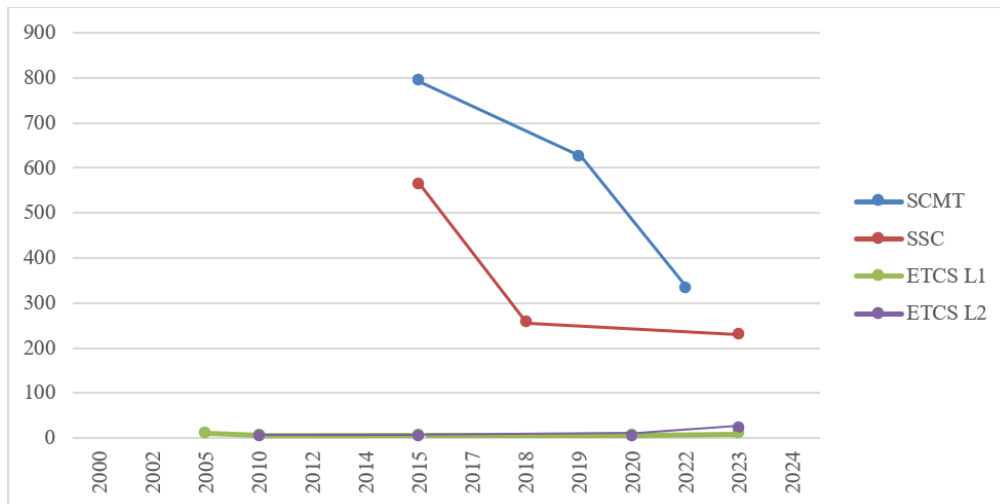


Figura 16- Grafico di confronto sull'andamento delle curve ad S relative all'indicatore di performance [km/ M€] per le tecnologie SCMT, SSC, ETCS L1, ETCS L2 in funzione del tempo [Anno]

Mostrare tutte le tecnologie sullo stesso grafico, Investimenti [M€] - Anni, è complesso dal momento che gli investimenti nelle nuove tecnologie sono ad oggi in numero minore e quindi è più difficile vedere gli andamenti degli investimenti di tutte le tecnologie. Concentrandosi sulle tecnologie emergenti o innovative, è chiaro che l'interesse maggiore è posto sulle tecnologie ETCS. Soprattutto per il livello 2 gli investimenti mostrano una ripida crescita. La curva della tecnologia ATO, il cui singolo andamento è molto basso, evidenzia come comunque si stia investendo per portare la tecnologia di segnalamento operante senza l'intervento dell'uomo non solo nell'ambito delle linee metropolitane ma anche nelle linee aperte. Diverso è il caso delle tecnologie ETCS L3, ERSAT, CBTC che al momento non mostrano grande attenzione attraverso gli investimenti per i motivi di seguito elencati:

- L'ETCS L3 prevede dei miglioramenti rispetto alle altre tecnologie ETCS che attualmente richiedono investimenti per operazioni di testing.
- La tecnologia ERSAT ad oggi è molto limitata su poche e brevi linee ferroviarie perché comporterebbe non solo un investimento per la realizzazione ma anche una coesione tra imprese diverse, quindi è più complesso da realizzare.
- La tecnologia CBTC attualmente utilizzata esclusivamente sulle linee metropolitane può essere valutata perché ci sono dei primi movimenti di investimenti al fine di poter sfruttare tale tecnologia anche sulle linee aperte e valutare eventuali vantaggi.

Dal grafico presente in Figura 17 è evidente come la direzione verso cui si sta andando è quella della tecnologia ETCS L2.

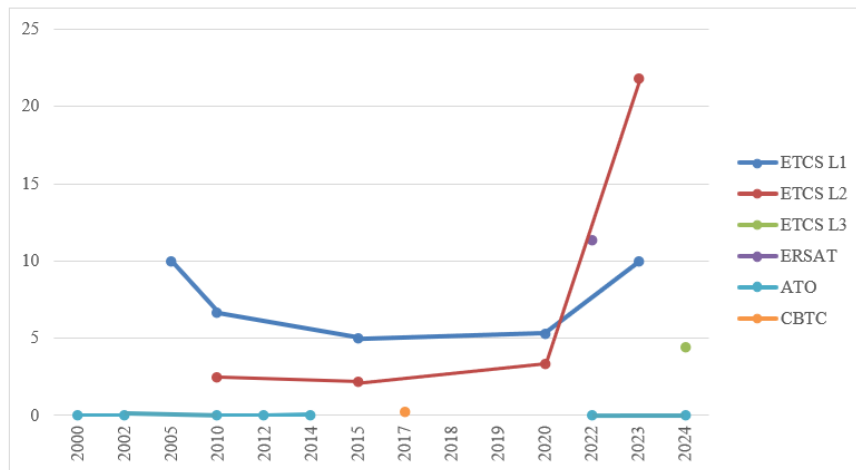


Figura 17- Grafico di confronto sull'andamento delle curve ad S relative all'indicatore di performance [km/ME] per le tecnologie innovative sul mercato in funzione del tempo [Anno]

Il secondo indicatore analizzato permette un confronto tra tecnologie attraverso il rapporto tra input e output, dove per input assumiamo le variabili al denominatore e come output la variabile al numeratore, come nella seguente formula:

$$\frac{\text{capacità}}{\text{velocità} \times \text{tempo risposta} \times \text{distanza frenata}}$$

La **capacità** delle linee ferroviarie è l'indicatore di performance più importante perché consente di racchiudere, in un'unica formula, le variabili i cui valori cambiano con lo sviluppo delle tecnologie. L'obiettivo dell'analisi è valutare come varia la capacità della linea ferroviaria nei casi delle diverse tecnologie del segnalamento ferroviario. L'evoluzione delle tecnologie, la spinta dell'UE che ha come obiettivo la mobilità 2030, si basano tutte sull'aumento di capacità delle linee come fine ultimo, per sopperire all'aumento della popolazione, per essere competitivi sul mercato rispetto a mezzi di trasporto alternativi [12].

Al denominatore, gli input specifici per ogni tecnologia sono i seguenti:

- Velocità [$\frac{km}{h}$]: ha subito un'evoluzione negli anni, con un aumento della velocità per le tecnologie più attuali;
- Tempo di risposta [sec]: è il tempo impiegato dal momento in cui viene ricevuto il segnale dai sistemi ed inviato a bordo treno, al momento in cui si attiva la frenata di emergenza;

- Distanza frenata [m]: corrisponde ai metri che deve percorrere un treno dal momento in cui viene attivata la frenata di emergenza al momento in cui il treno si ferma in funzione della velocità massima raggiungibile.

	Anno	N° treni / h	Distanza frenata [m]	Velocità [km/h]	Tempi risposta segnale [sec]	CAPACITÀ della linea ferroviaria
SCMT	2000	12	1500	180	2	0,000022
	2010	12	2000	200	2	0,000015
	2020	15	2500	250	2	0,000012
SSC	2010	12	1200	120	2	0,000042
	2020	15	1700	130	2	0,000034
ETCS L1	2000	20	2000	160	2	0,000031
	2010	30	2000	200	2	0,000038
	2020	30	2500	250	1	0,000048
ETCS L2	2018	30	3000	300	1	0,000033
	2023	42	3500	350	1	0,000034
ETCS L3	2020	30	3000	350	0,3	0,000095
ATO	2022	40	3000	300	0,5	0,000089
ERSAT	2020	35	2500	250	1	0,000056
CBTC	2017	20	1200	120	2	0,000069

Tabella 5- Dati numerici per la formula individuata dell'indicatore della capacità della linea ferroviaria valutati per tecnologia e con evoluzioni annuali

Le tre variabili al denominatore sono l'una in funzione dell'altra ma incidono sulla capacità, definendo, per ogni tecnologia del segnalamento, diversi andamenti dell'indicatore di performance.

La velocità, in metri, e i tempi di risposta del segnale, in secondi, sono alla base delle evoluzioni delle tecnologie e incidono sulla variabile della distanza di frenata. L'interesse delle imprese che si occupano delle tecnologie del segnalamento ferroviario e dei Paesi che le adottano, non è quello di avere soltanto treni più veloci, ma anche treni con efficienti sistemi di segnalamento in modo da rendere qualsiasi operazione più rapida e sicura, evitare incidenti, velocizzare le attività in modo da aumentare la capacità sulla linea. Un aumento del numero di treni all'ora, comporta risultati migliori per i gestori delle linee ferroviarie e per i Paesi dal momento che rispondono in modo efficiente ed efficace alla domanda crescente.

Di seguito sono riportati i grafici dell'indicatore Capacità per ogni tecnologia del segnalamento ferroviario. I grafici di interesse sono quelli relativi alle tecnologie SCMT, SSC, ETCS L1 e ETCS L2, presenti in Figura 18, poiché mostrano un andamento negli anni, diversamente dalle altre tecnologie che hanno un valore puntuale e non è possibile valutare l'andamento nel tempo.



Figura 18- Andamento dell'indicatore di performance "Capacità" nel tempo per le tecnologie SCMT, SSC, ETCS L1 e ETCS L2

Per valutare lo stato delle tecnologie e quale emergerà in futuro o se resterà più stabile quella attuale, è utile rappresentare le curve dell'indicatore di performance della capacità su un unico grafico.

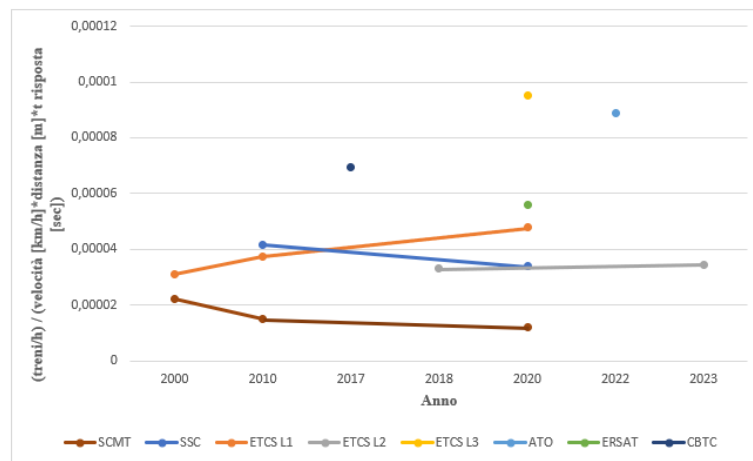


Figura 19- Grafico di confronto dell'andamento dell'indicatore di performance "Capacità" nel tempo per le tecnologie del segnalamento ferroviario

Come mostrato nel grafico in Figura 19, le tecnologie tradizionali, quali SSC ed SCMT, sono in leggera fase di declino perché non ci sono più piani di investimento per nuove linee, e quelle preesistenti sono in fase di dismissione e sostituzione con le nuove tecnologie. Nonostante ciò, la tecnologia SCMT è ancora diffusa in gran parte della linea ferroviaria italiana. Inoltre, i valori più bassi relativi agli indicatori di performance delle tecnologie SCMT ed SSC sono dovuti al fatto che si tratta di tecnologie presenti sul territorio nazionale Italiano, a differenza delle altre tecnologie analizzate, i cui dati sono riferiti all'intera linea ferroviaria europea. Il calo dei valori della capacità negli anni non è dovuto al fatto che ci siano fenomeni peggiorativi della tecnologia, ma il numero di treni orari per queste tecnologie si sta riducendo per lasciar spazio alle nuove tecnologie ERTMS/ETCS.

Attualmente, le tecnologie in fase di studio, analisi ed applicazione sono ETCS L1 e ETCS L2. Entrambe mostrano un andamento crescente, sebbene l'ETCS L2 abbia una crescita più lenta dal momento che i primi studi sono stati fatti soltanto nel 2018.

Le tecnologie ETCS L3, ATO, ERSAT, CBTC, sebbene diano valori dell'indicatore di performance più elevato, attualmente corrispondono a semplici punti perché sono tecnologie in fase di studio e testing, quindi, non ancora diffuse sulle linee ferroviarie. È evidente come queste tecnologie, essendo le più innovative, hanno tempi di risposta del segnale molto bassi rispetto alle altre tecnologie, velocità elevate e quindi garantiscono la possibilità di avere più treni ogni ora sulla linea ferroviaria.

2.3 Modello di Abernathy e Utterback

Il modello di Abernathy e Utterback aggiunge altre tre curve alla curva dell'indicatore di performance, che in questo caso è l'indice della capacità delle linee ferroviarie. L'innovazione è quindi descritta in totale da quattro curve:

-PERFORMANCE;

-VENDITE;

-NUMERO DI IMPRESE: variazione nel settore industriale;

-TASSO DI INNOVAZIONE: numero di brevetti, variabili nel tempo, legati alla tecnologia.

Queste curve, osservano le dinamiche dell'innovazione dal lato del settore industriale e non guardano il lato clienti.

Ciascuna curva evolve in tre fasi: la FASE FLUIDA, la FASE di TRANSIZIONE e la FASE SPECIFICA.

Nella fase fluida, essendo una fase di incubazione, si hanno più tecnologie che competono per diventare la tecnologia emergente. Le tecnologie sono tante e hanno performance basse e la domanda è bassa e si distribuisce sulle diverse tecnologie.

Il mercato sceglie una tecnologia specifica. Si afferma il DOMINANT DESIGN, cioè un'architettura di prodotto/servizio. In questo modo, da tante tecnologie/architetture possibili a una tecnologia/architettura possibile.

La fase specifica, è quella di strutturazione del paradigma, cioè la singola tecnologia/architettura viene migliorata nelle performance o nel caso dei prodotti, vengono efficientati i processi produttivi legati a quei prodotti. Efficientare un processo produttivo serve per abbassare i costi di produzione e quindi il prezzo.

È possibile concentrarsi sul caso specifico dell'emergere della tecnologia ETCS del segnalamento ferroviario, nello specifico ETCS L2 dal momento che è quello verso cui l'UE sta evolvendo ed attualmente oggetto di interesse e studio.

L'andamento della performance per la tecnologia ETCS L2 presente in Figura 20, riporta il grafico studiato nel paragrafo precedente per l'indicatore della capacità della linea.

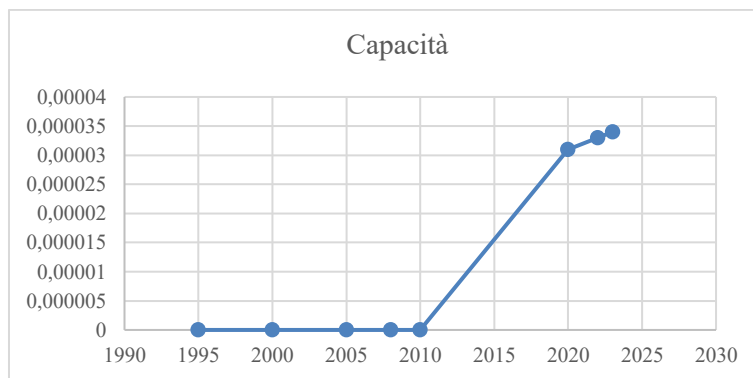


Figura 20- Andamento dell'indicatore di performance "capacità" della tecnologia ETCS L2

È possibile tracciare una seconda curva a S che segue approssimativamente la curva a S delle performance e che rappresenta la diffusione dell'innovazione nel mercato, ovvero quella che è definita come "curva delle vendite". Questa curva corrisponde alla frazione di potenziali utenti o imprese che, in un dato momento, hanno deciso di adottare la tecnologia. In termini assoluti, la curva di diffusione rappresenta le vendite di adozioni cumulate, cioè le vendite agli utenti che adottano la tecnologia per la prima volta. Le vendite di adozione sono solo una parte delle vendite complessive, che includono anche gli acquisti successivi effettuati dagli adottanti, le ulteriori vendite (vale a dire, le vendite agli utenti che desiderano possedere più di uno di questi prodotti) e le vendite sostitutive (le vendite agli adottanti che sostituiscono il loro prodotto con uno nuovo a causa dell'usura o dell'obsolescenza). Quando si procede lungo la curva a S delle vendite, si hanno tre fasi principali, che vengono rispettivamente denominate:

- **Incubazione:** in questa fase si deve mettere a punto la tecnologia (sia la performance che la diffusione devono ancora "decollare");
- **Diffusione:** dominano le vendite di adozione e l'impresa deve convincere il mercato dell'utilità di tale tecnologia (quando le prestazioni e la diffusione crescono in modo significativo);
- **Maturità:** non ci sono più le vendite di adozione ma solo quelle aggiuntive e sostitutive (quando si avvicinano alla saturazione).

Le vendite cumulate hanno un andamento ad S perché seguono le performance, se le performance sono basse l'adozione sarà bassa.

Le vendite in questa analisi fanno riferimento al numero di veicoli venduti con tale tecnologia. L'analisi è stata effettuata sul sito internet ufficiale "ERTMS" (ertms.net) e dalla mappa

interattiva (“Deployment World Map”) sono stati raccolti i dati relativi alle vendite dei veicoli attrezzati con tecnologia ETCS L2 per ogni Paese dell’Unione Europea. Come mostrato in Figura 21, le vendite dei mezzi che basano il loro funzionamento su tale tecnologia sono state avviate dal primo decennio del 2000 nei Paesi che oggi assumono il ruolo di innovatori nel settore del segnalamento ferroviario, quali Italia, Spagna, Svizzera e Inghilterra, grazie alle aziende leader del settore Alstom, Ansaldo, Siemens e Hitachi. A queste, negli anni, si sono aggiunte molte altre imprese del settore.

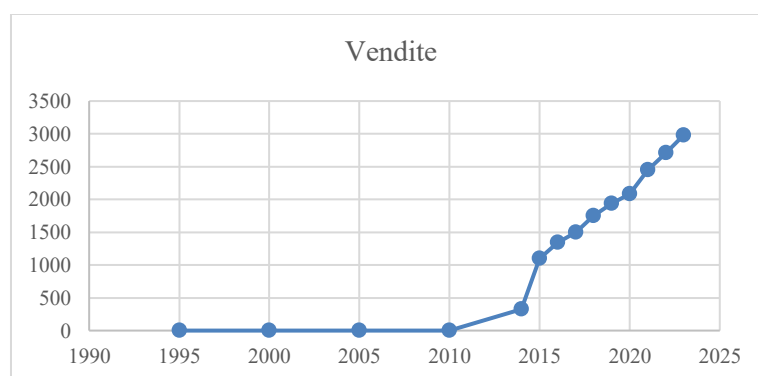


Figura 21- Andamento delle vendite della tecnologia ETCS L2

I grafici relativi al “n° di imprese” e “tasso di innovazione” sono correlati tra loro. I dati sono stati raccolti dal sito Internet “Patent Inspiration”, per cui ad ogni brevetto sono associati la data di pubblicazione e l’inventore o autore.

È evidente come, la curva per il numero di imprese comincia a crescere qualche anno prima rispetto alle due curve analizzate precedentemente poiché si valuta l’ingresso di tale impresa nel mercato e i suoi primi studi, di cui si tiene traccia attraverso le pubblicazioni.

I dati relativi al numero di imprese non sono estremamente precisi. È importante specificare che nella rappresentazione del grafico seguente, sono state considerate soltanto le grandi imprese del settore, sebbene un valore aggiunto nello studio della tecnologia lo stiano dando le start-up o piccole e nuove imprese di cui al momento non si conosce con esattezza il numero, se non per alcune imprese quali: Huawei, Nokia Corporation, Cisco Systems.

Nel mercato del segnalamento ferroviario il numero di imprese è molto limitato come mostrato in Figura 22. All’inizio, il mercato della tecnologia ETCS L2, era costituito dalle imprese già operanti nel campo del segnalamento ferroviario e che già avevano operato con sistemi del tipo

ETCS L1. Il numero di imprese che cominciano ad investire su questa tecnologia è crescente. Le prime aziende leader che hanno cominciato a studiare la tecnologia sono state: Alstom, Ansaldo/Hitachi, Siemens, Bombardier, Thales. Da queste, c'è stato un incremento costante fino ad inserire nel settore aziende come Nokia, Huawei, Cisco che hanno collaborato al fine di permettere evoluzioni nel sistema ETCS.

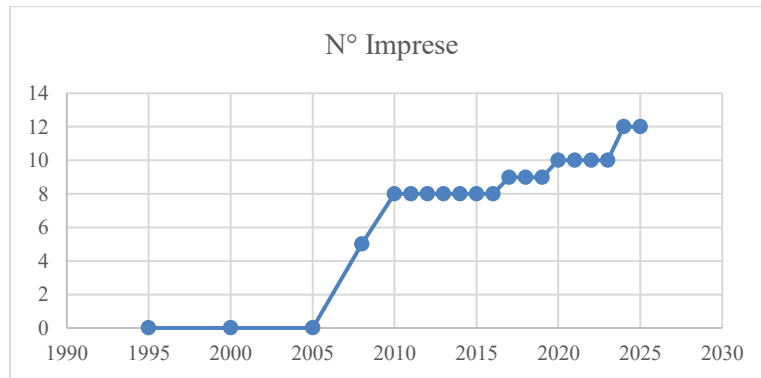


Figura 22- Andamento del numero di imprese incumbent ed entranti nella tecnologia ETCS L2

Il grafico del tasso di innovazione, in Figura 23, corrisponde all'andamento del numero di brevetti pubblicati negli anni in merito alla tecnologia ETCS L2. Per ricavare il numero di brevetti la ricerca condotta sul sito "Patent Inspiration" è stata eseguita con le parole chiave "ERTMS/level 2/railway". Oltre alle aziende note ci sono anche Università, centri di ricerca e ricercatori.



Figura 23- Andamento del numero di brevetti pubblicati per la tecnologia ETCS L2

Per comprendere la situazione in cui si trova ciascuna tecnologia è utile rappresentare gli andamenti di ciascuna tecnologia su un unico grafico, seguendo il modello di Abernathy e Utterback.

Per l'analisi si considera soltanto la tecnologia tradizionale SCMT che è quella al momento più diffusa e le due tecnologie dell'ETCS su cui adesso ci si sta concentrando.

Il grafico seguente, Figura 24, mette a confronto le performance relative alla capacità delle tecnologie SCMT ed ETCS L1 e L2. La tecnologia SCMT sebbene sia ancora utilizzata, in questo momento si trova in una fase di maturità, in cui gli unici interventi fatti sono di manutenzione.

La curva dell'ETCS L2 mostra un tratto breve che parte dall'anno 2020, con valori più bassi dell'ETCS L1 che al momento è la tecnologia più diffusa in Europa, ma più alti dell'SCMT che è una tecnologia di carattere nazionale. La curva è crescente, si trova in una fase intermedia tra incubazione nel quale mettere a punto alcuni aspetti tecnici e diffusione dal momento che viene adottata in alcune zone dell'Europa ma bisogna convincere la restante parte del territorio europeo ad adottarla.

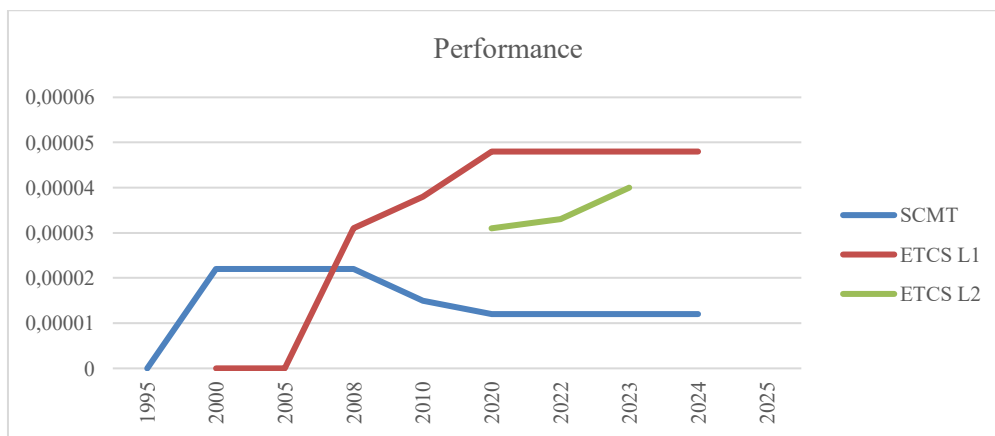


Figura 24- Confronto tra le performance relative alla capacità della linea con l'uso delle tecnologie SCMT ed ETCS L1 e L2

Quanto detto per le performance, ha un riflesso sul grafico delle vendite.

La curva delle vendite di veicoli dotati di tecnologia SCMT comincia a crescere intorno all'anno 2005. Attualmente ha raggiunto il periodo di maturità e il motivo per cui non c'è una riduzione è dovuto ai costi che bisogna continuare a sostenere per la manutenzione delle linee presenti che attualmente non sono state implementate con la tecnologia ETCS.

La tecnologia ETCS L1 è in una fase di diffusione perché dopo essere stata perfezionata ed implementata si sta diffondendo con vendite in Italia, Francia, Spagna, Svizzera, Ungheria, Bulgaria, Grecia, Inghilterra e Austria.

I dati di vendita più bassi, tra quelli di seguito evidenziati, sono quelli relativi alla tecnologia ETCS L2. Le prime vendite per l'ETCS L2 sono avvenute nel 2014 e stanno crescendo lentamente (Figura 25).

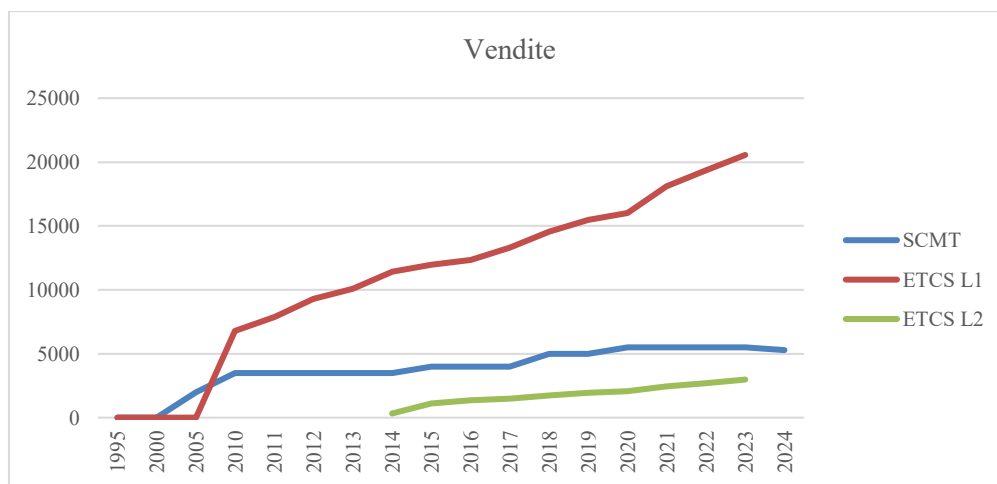


Figura 25- Confronto tra le vendite delle tecnologie SCMT ed ETCS L1 e L2

Il numero di imprese è variabile perché le imprese leader del settore si stanno avvicinando a nuove imprese o start up con cui possano collaborare. Per questo motivo, la tecnologia ETCS L2 a differenza delle altre due con cui è stato eseguito il confronto, mostra un andamento ancora in crescita (Figura 26)

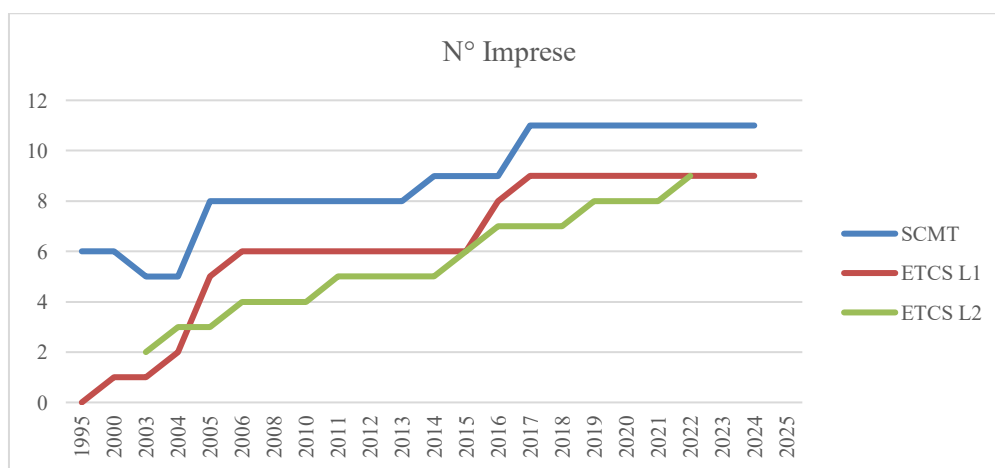


Figura 26- Confronto tra il numero di imprese che si occupano di tecnologie SCMT ed ETCS L1 e L2

L'ultimo grafico appartenente ai quattro del modello di Abernathy e Utterback mostra l'andamento delle pubblicazioni negli anni (Figura 27).

La tecnologia SCMT sebbene si sia affermata nei primi anni 2000, è molto presente soltanto in Italia, quindi la curva risulta essere molto bassa posta a confronto con tecnologie quali ETCS e ATO per cui l'interesse è di livello globale.

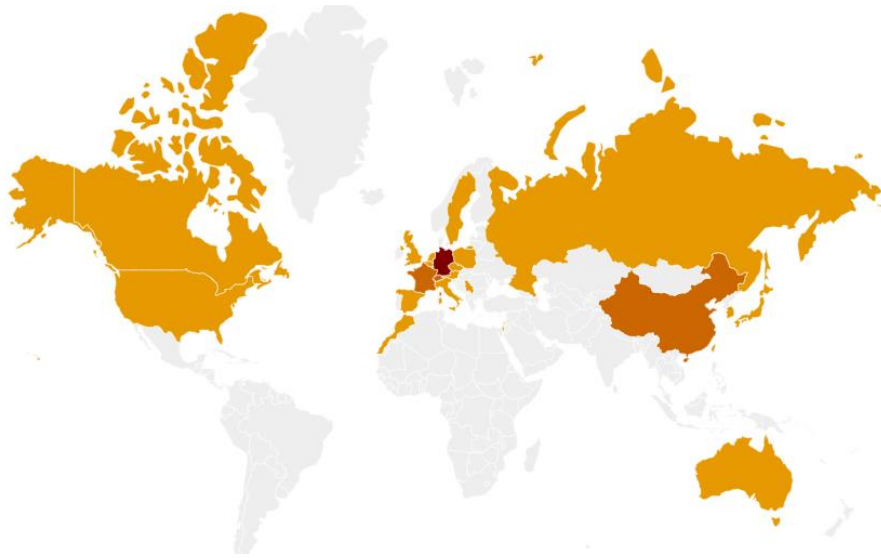
È evidente come sia forte l'interesse verso la tecnologia ETCS L2, i cui studi sono notevoli e in forte crescita anche per la grande spinta in termini di finanziamenti che l'Unione Europea sta eseguendo al fine di ottenere l'interconnessione delle linee ferroviarie internazionali europee, ma anche per seguire la scia della decarbonizzazione globale.

Il numero di brevetti e l'anno di pubblicazione sono stati raccolti dal sito internet "Patent Inspiration" e per ciascuna tecnologia sono state individuate delle parole chiave al fine di filtrare la ricerca come di seguito spiegato:

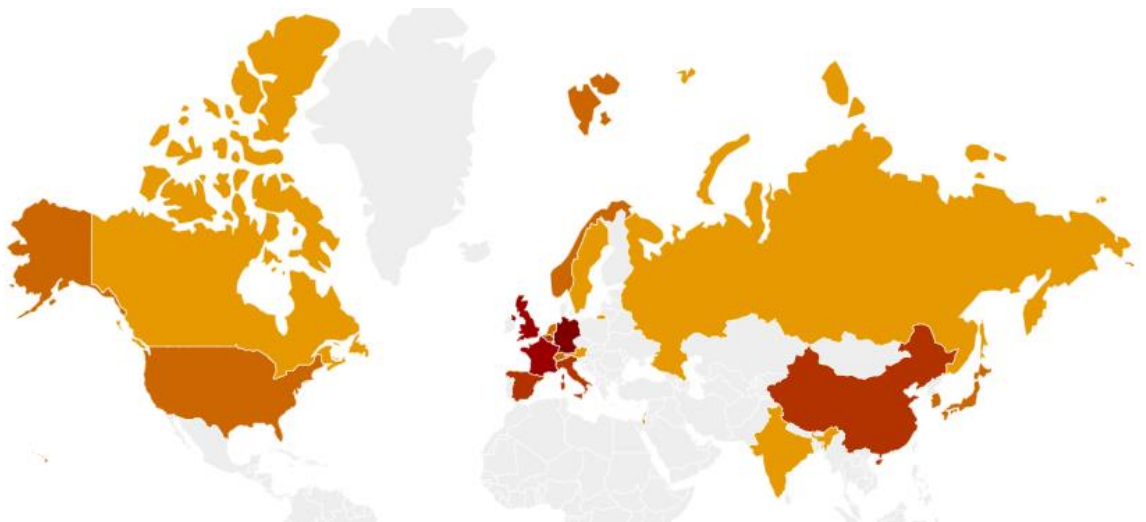
- Per la tecnologia SCMT i brevetti pubblicati negli anni sono stati individuati utilizzando le seguenti parole di ricerca: SCMT, train, railway. Il numero esiguo di brevetti emerso dalla ricerca condotta è pari a 22.



- Per la tecnologia ETCS L1 sono state utilizzate come parole chiave di ricerca: ETCS, level 1, train, railway. L'andamento del numero di brevetti pubblicati è quasi sempre crescente. Si pone l'attenzione sugli anni in cui sono stati pubblicati, partendo dai primi anni di ricerche fino ad oggi.



- L'andamento della curva della tecnologia ETCS L2 è quello più ripido verso l'alto, dovuto al grande interesse mostrato dall'Unione Europea, che ha finanziato così, imprese leader nel settore, Università e centri di ricerca. Le parole chiave di ricerca che hanno portato a questi risultati molto alti rispetto agli altri due casi sono: ERTMS, level 2, railway.



- È stato inserito l'andamento delle pubblicazioni per la tecnologia ATO al fine di evidenziare che una tecnologia, sebbene non ancora utilizzata e diffusa, nelle fasi iniziali, è caratterizzata da pubblicazioni e studi per cominciare ad avvicinarsi al mercato per ridurre l'intervento umano e quindi riducendo l'errore grazie all'automazione.

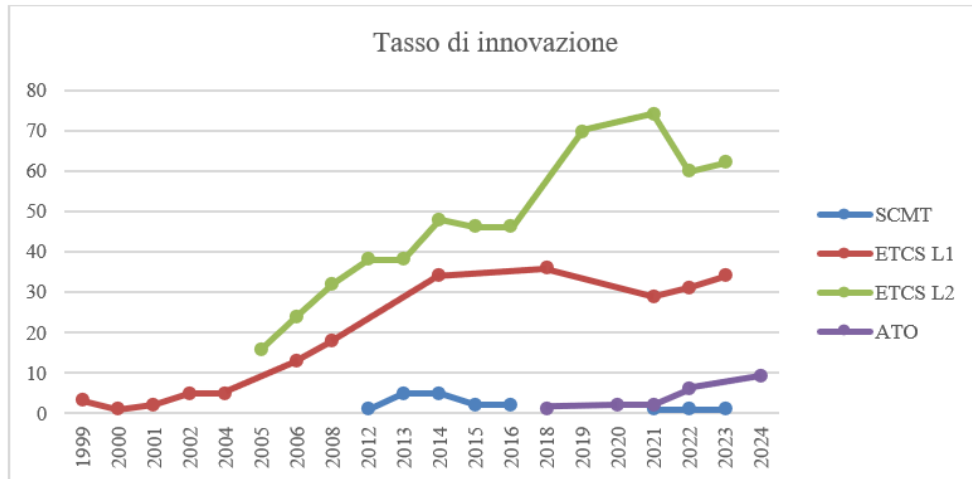


Figura 27- Confronto tra il numero di brevetti pubblicati per le tecnologie SCMT ed ETCS L1 e L2

Dall'analisi emerge la tecnologia ETCS L2 come tecnologia del futuro con performance, numero di imprese e vendite in crescita, ma anche continua crescita del tasso di innovazione sempre più alto rispetto alle tecnologie concorrenti.

2.4 Modello di Rogers (o modello di Moore)

Il modello di Rogers, anche detto modello di Moore, analizza i segmenti di mercato che una tecnologia incontra nell'approcciarsi al mercato.

A seconda del tipo di tecnologia, si individuano cinque segmenti sulla base della percentuale di mercato potenziale raggiunta:

- **Innovators**
- **Early adopters**
- **Early majority**
- **Late majority**
- **Laggards**

Nel gruppo degli *innovators* rientrano tutti coloro che sono appassionati di tecnologia. Sono disposti ad adottare la tecnologia nei primi stadi, correndo il rischio che la tecnologia possa rivelarsi non utile. I primi adottatori sono responsabili del miglioramento della tecnologia, collaborando con le aziende seguendo le logiche *demand pull* e *technology push*.

Dalle curve ad S di diffusione si osserva che i clienti adottano la tecnologia in momenti molto diversi lungo il ciclo di vita del prodotto perché, per natura, tutti gli esseri umani e le organizzazioni sono diversi tra loro. Ciò porta all'opportunità di comprendere e distinguere i segmenti della clientela che si possono trovare lungo il ciclo di vita del prodotto. La segmentazione più popolare è stata proposta da Rogers ed è mostrata nel grafico in Figura 28. Il grafico corrisponde alla **curva delle vendite di diffusione** che può essere approssimata ad una curva di distribuzione normale, suddivisa nel punto medio e nelle deviazioni standard -2 , -1 e $+1$. La segmentazione risultante è comune alla maggior parte dei casi di diffusione della tecnologia.

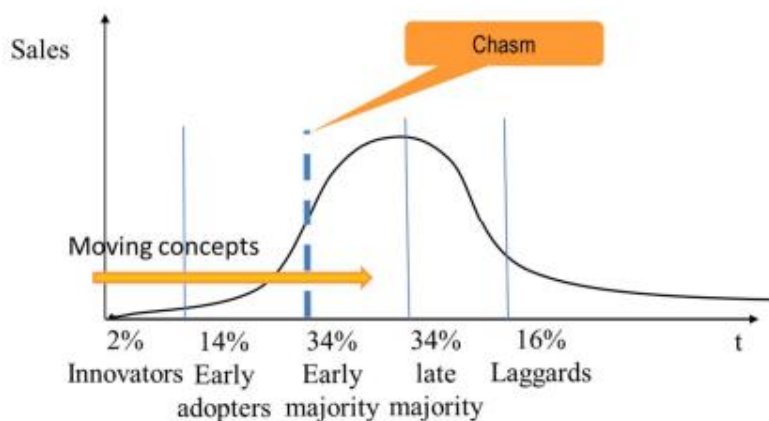


Figura 28- Curva di Rogers o curva di Moore (fonte: Libro - "Management of innovation and product development")

Studiando questa segmentazione, Rogers ha individuato l'esistenza di una lacuna, detta baratro (*chasm*), la quale si crea tra i primi utilizzatori o early adopters e i primi segmenti di maggioranza o early majority.

Di seguito si analizza la divisione del mercato tra *innovators*, *early adopters*, *early majority*, *late majority* e *laggards* nello studio delle tecnologie del segnalamento ferroviario.

A livello globale, i Paesi che si sono occupati dello studio e/o dell'adozione della tecnologia ETCS sono:

- Europa
- Asia
- Africa

- America Latina
- Oceania

La suddivisione percentuale del mercato è mostrata negli aerogrammi sottostanti. Come evidenziato sul sito Internet "Ertms.net", nel grafico a sinistra è rappresentata la divisione in percentuale del mercato relativo ai chilometri a contratto con tecnologia ETCS nel mondo. A destra, è mostrata la percentuale di ciascun Paese in termini di numero di veicoli a contratto con tecnologia ETCS a livello globale.

Da un primo sguardo, negli aerogrammi in Figura 29, è chiaro che l'Europa sia il Paese leader per tale tecnologia che, come si evidenzia nell'analisi PESTEL, ha definito dei piani per la mobilità 2030-2050 basandosi sull'ETCS.

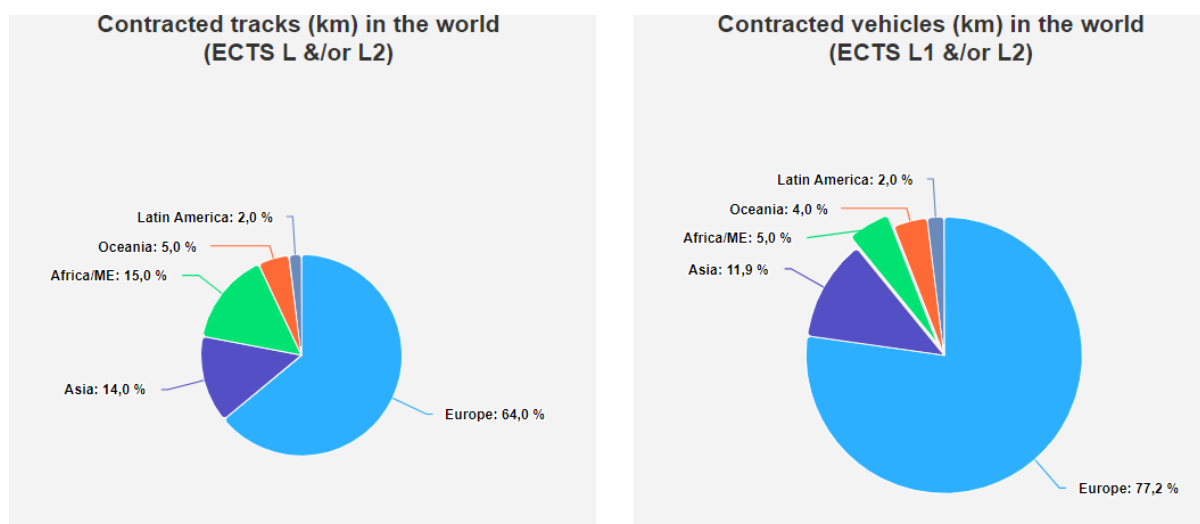


Figure 29- Distribuzione percentuale delle vendite relative alla tecnologia ETCS L1/L2 in termini di chilometri realizzati linea (diagramma a torta a sinistra) e di numero di veicoli venduti (diagramma a torta a destra) nel mondo

Gli istogrammi sottostanti, mostrano le adozioni a livello Europeo e di seguito a livello globale della tecnologia ETCS, considerando i Paesi nel dettaglio.

Dal grafico relativo alla situazione Europea, si evince che ci sono Paesi con valori più alti quindi con una linea ferroviaria molto più estesa e questo è dovuto al fatto che la tecnologia sia stata adottata molto prima di altri Paesi. **Belgio, Francia e Spagna** sono gli *innovators* e hanno valori poco più alti dei 7000 chilometri. I clienti del primo segmento adottano perché "guardano al futuro" e quindi, sono pronti ad accettare una tecnologia relativamente immatura.

Polonia, Norvegia, Svizzera e Danimarca sono gli *early adopters*. La Danimarca, nello specifico, si è adeguata subito alla nuova tecnologia di segnalamento, dal momento che la sua linea ferroviaria era vecchia e quindi prossima a un totale rinnovamento. I Paesi appartenenti agli *early adopters* hanno un'ampia capacità di spesa, perché nei primi periodi la tecnologia comporta costi elevati.

Paesi come **Repubblica Ceca, Italia, Germania, Ungheria, Austria, Romania, Grecia e Bulgaria** hanno adottato la tecnologia più tardi, quindi, ad oggi le linee specialmente dell'ETCS L2, non sono molto estese. Questi Paesi fanno parte degli *early majority*. Nella fase di diffusione delle tecnologie, le aziende si concentrano sui Paesi appartenenti a questo gruppo con l'obiettivo di ridurre i costi sebbene il rischio è quello di perdere in aspetti tecnici. Per le aziende in fase di diffusione, è quindi importante concentrarsi sull'esperienza, in modo che le competenze acquisite per alcuni mercati, si ribaltano su altri in cui c'è chi acquista la tecnologia anche a costi più alti, si creano economie di scala e poi si diffonde, diventando *affordable*. Sono interessati al **bilancio costi- benefici**, aspetto importante quando si vuole adottare una tecnologia matura.

Chilometri di linea (Europa)

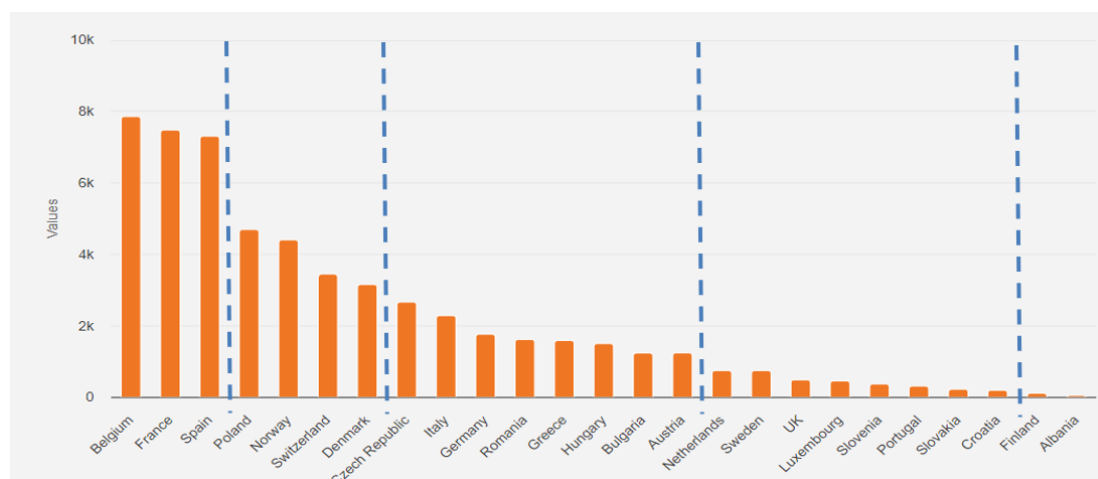


Figura 30- Istogramma che rappresenta la relazione tra i chilometri di linea espressi in migliaia (k) e i Paesi Europei in cui si estendono

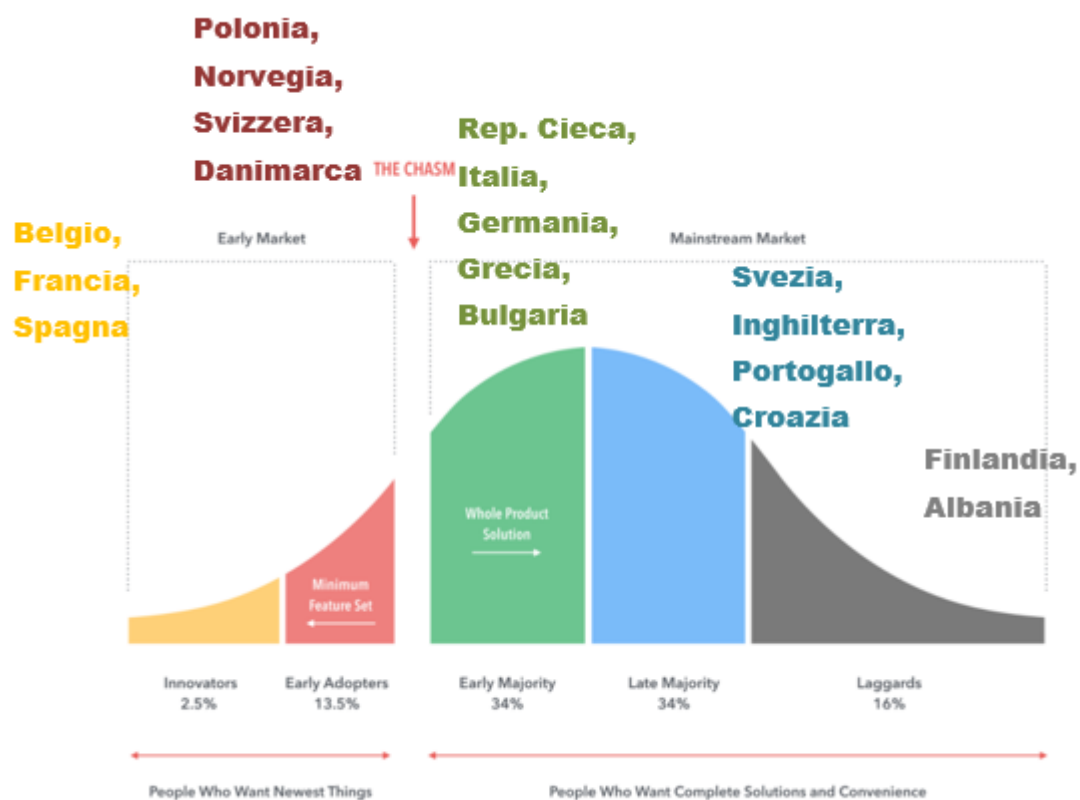


Figure 31- Paesi in cui è presente la tecnologia ETCS L2 secondo la classificazione di Rogers

Come detto sin dall'inizio, l'intera analisi si è concentrata sulla linea europea per analizzare la tecnologia, le politiche dell'Unione Europea al fine di garantire l'interoperabilità. Sebbene l'ETCS sia stata considerata maggiormente una tecnologia Europea, è diffusa in altre aree geografiche (Figura 31).

A livello globale la Turchia è l'unico Paese appartenente al gruppo degli *innovators*. Saudi Arabia e Australia sono gli *early adopters* della tecnologia.

Chilometri di linea (Mondiale)

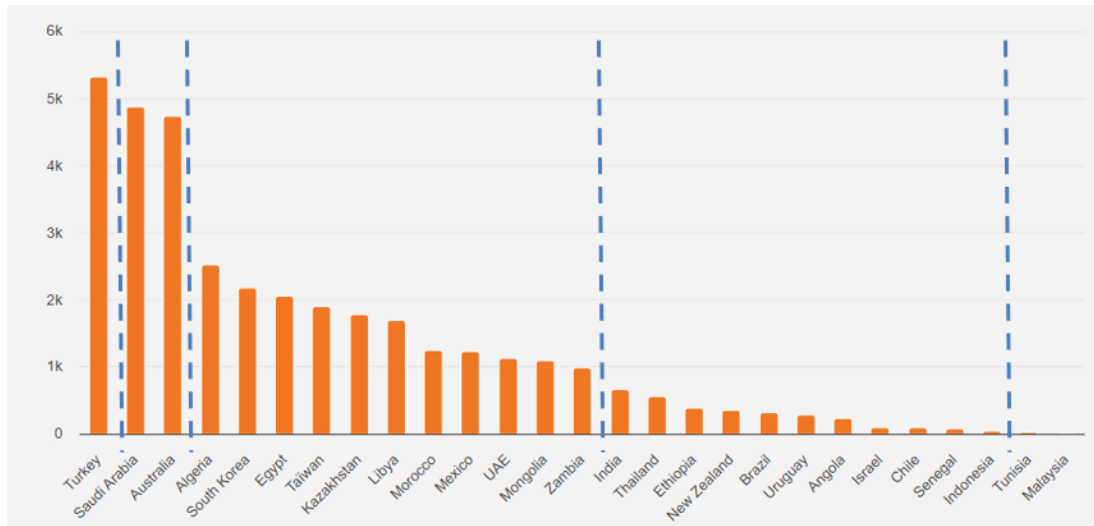


Figura 32- Istogramma che rappresenta la relazione tra i chilometri di linea espressi in migliaia (k) di chilometri, e i Paesi a livello globale in cui si estendono

Per comprendere l'interesse del Mondo verso la tecnologia ETCS è possibile consultare il sito internet "ertms.net" nella sezione "Deployment World Map" (Figura 32).

L'Europa è l'area con la maggiore estensione della linea ETCS, di entrambi i livelli 1 e 2, nello specifico nel caso della Germania è presente un breve tratto con livello 3.

In Asia è presente la tecnologia ETCS prevalentemente di livello 1 rispetto al livello 2. Gli adottatori di tale tecnologia sono Paesi come Turchia, Kazakistan, Mongolia, Corea del Sud, Indonesia, Malesia, Taiwan, India e Saudi Arabia. Se nella maggior parte dei paesi elencati sia presente il livello 1 della tecnologia ETCS, in Arabia Saudita la linea ETCS è prevalentemente di livello 2.

L'Australia, a differenza della breve tratta con livello 1 della Nuova Zelanda, presenta nella parte settentrionale un'estensione maggiore della linea ETCS livello 2.

Nel Continente Americano, soltanto Messico, Uruguay, Brasile e Cile presentano linee con ETCS. Nello specifico il Messico presenta una linea ferroviaria dotata di sistema ETCS livello 2.

CAPITOLO III

Analisi PESTEL

3.0 Analisi PESTEL

Il mondo sta affrontando sfide globali acute che sono transnazionali e richiedono azioni collettive. Il riscaldamento globale, la pandemia di COVID-19 e l'instabilità politica in Europa e in altre parti del mondo, hanno portato grande incertezza e sono necessarie azioni decisive da parte di Governi e settore privato.

Gli obiettivi delle Nazioni Unite (ONU) e dell'UE nella lotta al riscaldamento globale, nell'adattamento agli impatti del COVID-19 e nel ripristino della stabilità nel mondo stanno convergendo, in particolare per quanto riguarda le questioni relative ai trasporti. La dichiarazione di Pechino ha invitato l'Assemblea generale delle Nazioni Unite a dichiarare il 2022-2032 Decennio ONU del trasporto sostenibile per aumentare la consapevolezza e l'azione globali sul trasporto sostenibile. Sono state identificate per accelerare urgentemente la trasformazione verso il trasporto sostenibile, quali:

- ampliare l'accesso delle comunità rurali remote attraverso lo sviluppo e l'implementazione di sistemi e infrastrutture di trasporto sostenibili;
- rispondere alle esigenze dei paesi in situazioni particolari espandendo sistemi e infrastrutture di trasporto sostenibili e migliorando i loro collegamenti con i mercati internazionali;
- rafforzare la connettività regionale e interregionale;
- aumentare la copertura, la tempestività e la qualità dei dati e stabilire un sistema armonizzato di raccolta, gestione e condivisione dei dati relativi al trasporto sostenibile per consentire un migliore monitoraggio e una migliore rendicontazione degli obiettivi.

La qualità dei servizi di trasporto ha un impatto importante sulla qualità della vita delle persone [13].

La politica dei trasporti dell'UE ha individuato obiettivi relativi all'economia e alla competitività nonché alla decarbonizzazione dei trasporti. Di seguito, sono elencati i concetti chiave che rientrano nelle tecnologie del segnalamento ferroviario:

- **Aumento dell'efficienza dell'intero sistema di trasporto.** Vengono fatte analisi tecnico-economiche delle tecnologie emergenti, analisi degli impatti sulla domanda di trasporto, analisi dei costi da sostenere, emissioni, congestione, accessibilità e impatti economici.

- **Rafforzare la competitività dell'industria europea.** Sono eseguite analisi sul contributo dei trasporti alla competitività economica, sia come elemento principale dell'attività economica (trasporto di persone e merci) sia come settore industriale stesso.
- Pionieri nel trasporto del futuro (prospettiva a lungo termine): attività di osservazione e previsione tecnologica, caratterizzazione tecnico-economica, **innovazione nei trasporti.**
- Decarbonizzazione e “greening” del sistema dei trasporti: analisi di tecnologie e misure per ridurre le emissioni di gas serra (GHG) dei trasporti e altre esternalità, sviluppo di metodologie per la stima dei costi esterni.

La strategia dell'UE per una mobilità sostenibile e intelligente definisce una tabella di marcia con dieci aree principali a supporto del piano per gli obiettivi climatici per il 2030.

Nel 2021, la Commissione europea (CE) ha presentato diverse proposte legislative e revisioni nel campo dei trasporti: **sistemi di trasporto intelligenti, reti transeuropee (TEN-T)** e la revisione del regolamento su una rete ferroviaria europea per un trasporto merci competitivo. Si prevede che la ferrovia svolga un ruolo critico in un sistema di trasporto multimodale integrato, offrendo viaggi passeggeri end-to-end e trasporto logistico. Insieme ad altri cambiamenti politici, sociali, economici, tecnologici e legali, determina la necessità di una nuova direzione strategica per il futuro sistema ferroviario target e la ricerca e l'innovazione necessarie per definirlo, completarlo e realizzarlo. Le ferrovie si stanno evolvendo secondo la politica attuale per diventare un sistema aperto condiviso tra molti attori, ognuno responsabile della propria parte del sistema.

Per ottimizzare il viaggio end-to-end da un punto di vista economico, ambientale e di sicurezza, sarà necessaria una comprensione comune di questioni come soglie di sicurezza, valutazione del rischio, in tutte le modalità. Ne consegue che per prestazioni ottimali del sistema di trasporto multimodale integrato sarà necessario applicare un approccio coerente a tutti i requisiti essenziali che attualmente si applicano al sistema ferroviario (sicurezza, affidabilità e disponibilità, protezione ambientale, salute, compatibilità tecnica, accesso) in tutte le modalità.

Con la crescente digitalizzazione, le esigenze dei settori stanno convergendo. Ad esempio, le questioni relative alla regolamentazione, alla separazione delle responsabilità e alla gestione della sicurezza dei veicoli stradali autonomi e delle loro infrastrutture sono molto simili a quelle

coinvolte nel funzionamento automatico dei treni. **Le ferrovie dovrebbero concentrarsi sullo sviluppo e sul miglioramento delle loro prestazioni e capacità in aree di punti di forza intrinseci.**

Ci sono diversi livelli di sviluppi tecnologici e richieste del mercato ferroviario all'interno dell'UE. In alcune aree, gli investimenti nell'ammodernamento e nel rinnovo delle infrastrutture potrebbero essere più vantaggiosi della ricerca per soddisfare le esigenze degli utenti/clienti. Inoltre, è anche chiaramente affermato che un cambiamento modale sarà privilegiato per il trasporto merci poiché oggi il 75% del trasporto merci interno viene trasportato su strada mentre una parte sostanziale delle merci dovrebbe spostarsi verso la ferrovia e le vie navigabili interne. Nella strategia sopra menzionata, l'obiettivo è fissato a raddoppiare il traffico merci su rotaia entro il 2050, ovvero da circa 385 miliardi di tonnellate per chilometro trasportati su rotaia nel 2015 a 770 miliardi di tonnellate per chilometro nel 2050, con una fase intermedia per trasportare 575 miliardi di tonnellate per chilometro entro il 2030 (+50% nel traffico merci su rotaia) mentre 455 miliardi di tonnellate per chilometro trasportati su rotaia nel 2019 [14].



L'obiettivo di aumentare e gestire al meglio la capacità delle linee ferroviarie è stato sostenuto a livello politico nella Dichiarazione Ministeriale “Corridoi merci ferroviari: il futuro del trasporto merci ferroviario in Europa” durante la Conferenza Ministeriale sul “Trasporto ferroviario innovativo – connesso, sostenibile, digitale” tenutasi a Berlino il 21 Settembre 2020 (la cosiddetta “dichiarazione di Berlino”). In questa dichiarazione, i ministri dei trasporti si sono impegnati per raggiungere i seguenti obiettivi:

- rafforzare e sviluppare ulteriormente i corridoi merci ferroviari;
- supportare gli attori del trasporto merci su rotaia affinché si adattino meglio alle esigenze del mercato;
- migliorare il trasporto merci su rotaia come uno dei modi più rispettosi dell'ambiente per trasportare le merci.

Questi obiettivi politici sono difficili da raggiungere e questo è spiegato dalle tendenze recenti. L'impatto dei trasporti sull'ambiente e sulla società è ancora molto elevato in quanto rappresenta circa il 25% delle emissioni europee, di cui il settore merci rappresenta il 30% delle emissioni

totali del settore dei trasporti, mentre il traffico passeggeri (principalmente auto private) rappresenta il restante 70%. Secondo alcuni studi recenti, il settore dei trasporti è uno dei settori più colpiti dalla crisi del Covid-19 e ha la maggiore riduzione delle sue emissioni di CO₂ emissioni.

Oggi la ferrovia è la modalità di trasporto di massa più sostenibile [13]. Pertanto, aumentare la quota modale del trasporto merci su rotaia nel breve termine è fondamentale per vincere la battaglia contro il cambiamento climatico. Infatti, il trasporto merci su rotaia, nonostante i crescenti volumi di trasporto, ha visto le sue emissioni di CO₂ e i consumi energetici in calo di quasi un terzo in vent'anni, mentre tutti gli altri mezzi di trasporto hanno visto aumentare le loro emissioni.

Anche il settore ferroviario ha dimostrato durante la crisi del Covid-19 la sua resilienza e adattabilità alla nuova situazione [15] e [16].

3.1 Fattore Politico

Il cambiamento climatico è diventato una vera sfida per le Nazioni Unite e l'Unione Europea. Entrambe le istituzioni ne hanno fatto una priorità politica, in particolare la riduzione dei GHG (emissioni di gas serra). I rischi del cambiamento climatico sono stati segnalati per la prima volta come una minaccia emergente dalle autorità degli Stati Uniti (USA) nel 2021.

La stabilità politica in tutto il mondo è stata scossa da vari conflitti: la Brexit nel 2020 per l'UE, l'uscita degli Stati Uniti dall'Afghanistan nel 2021, il costante aumento dell'ultranazionalismo in molti Paesi europei, nel 2022 l'invasione russa dell'Ucraina, il crescente numero di colpi di stato in Africa (Malesia, Niger, Burkina Faso, Gabon, Guinea, Ciad e Sudan), la guerra Israele/Hamas.

Approcciarsi a questioni sociali/ambientali/economiche valutando una alla volta, non ha prodotto risultati efficienti. Ciò è stato anche il caso delle ferrovie dell'UE, dove i grandi progetti non hanno prodotto pienamente i risultati attesi. Ad esempio, nell'ambito della revisione del regolamento su una rete ferroviaria europea per un trasporto merci competitivo, il Parlamento europeo ha concluso che, a causa dell'insufficiente coordinamento nella gestione del traffico e nei lavori infrastrutturali, i corridoi merci ferroviari non hanno portato a un aumento del trasporto su rotaia lungo i corridoi.

Ingenti fondi UE sono stati e saranno resi disponibili per i trasporti, comprese le ferrovie, nell'ambito di varie iniziative UE: programma InvestEU, fondo di recupero UE, Next EU generation, piattaforma di investimento Green Rail, Connecting Europe Facility, **Horizon Europe**. Questi sono segnali della buona volontà dell'UE nel compiere sforzi per raggiungere gli obiettivi del Green deal e del Fit for 55.

Il 2021 è stato l'anno europeo delle ferrovie. Le iniziative hanno sottolineato il ruolo essenziale della ferrovia nel trasporto "porta a porta". La CE prevede i seguenti studi di fattibilità:

- etichetta europea per promuovere beni e prodotti trasportati su rotaia per incoraggiare le imprese a convertire i loro trasporti su rotaia;
- **indice di connettività ferroviaria**, che classifica il livello di interoperabilità raggiunto con i servizi sulla rete ferroviaria e mostra il potenziale della ferrovia per competere con altre modalità di trasporto.

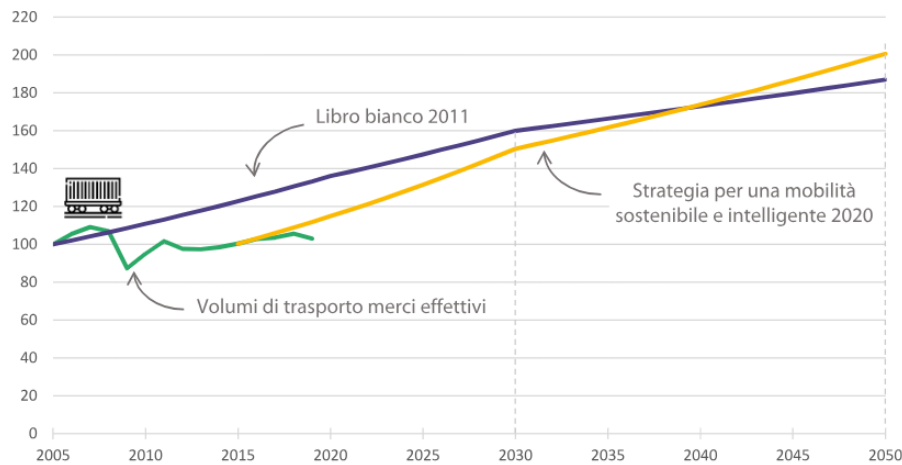
Raggiungere gli obiettivi imposti dalla Commissione Europea per il 2030 è molto complesso. Di seguito sono evidenziati alcuni motivi:

-nella valutazione d'impatto del libro bianco del 2011 si ipotizzava che sulla rete sarebbero stati ammessi treni con una lunghezza massima di 1 500 metri (contrariamente all'attuale requisito di 740 metri previsto dal regolamento TEN-T);

-la valutazione d'impatto alla base della Strategia del 2020 faceva riferimento a una carenza di investimenti di 100 miliardi di euro all'anno per il periodo 2021-2030, che avrebbe dovuto essere colmata affinché le previsioni diventassero realtà. Tuttavia, la Commissione non ha specificato come fare in modo che gli Stati membri mettessero a disposizione i fondi necessari in tempo utile.

Le stime della Commissione Europea sui volumi di traffico necessari affinché il trasporto ferroviario e quello per vie navigabili conseguissero i valori-obiettivo erano eccessivamente ottimistiche. Ad esempio, nel libro bianco del 2011, la Commissione ha stimato che il traffico merci su rotaia sarebbe aumentato del 60 % tra il 2005 e il 2030 e dell'87 % tra il 2005 e il 2050. È improbabile che questa previsione diventi realtà in assenza di nuove politiche, dato che il traffico merci su rotaia è cresciuto solo dell'8 % nell'ultimo decennio (dal 2010 al 2019).

Rispetto alla crescita del traffico merci su rotaia stimata nel libro bianco del 2011, la Strategia del 2020 ha fissato valori-obiettivo di volume inferiori per il 2030 e superiori per il 2050. Poiché la quota del trasporto ferroviario è aumentata solo in misura limitata dal 2010 al 2019, i tassi di crescita annuali necessari per raggiungere i valori-obiettivo della Strategia del 2020 sono ora ancora più ambiziosi rispetto al 2011 (Figura 33).



Fonte: Corte dei conti europea, sulla base delle stime della Commissione e dei dati del documento *EU Statistical Pocketbook*.

Figura 33- Andamento volumi di trasporto merci sulle linee ferroviarie rispetto alla richiesta della Commissione Europea

Nella proposta del 2021 di revisione del regolamento TEN-T, la Commissione ha inserito nuove disposizioni volte a rafforzare il ruolo della Commissione nel favorire lo sviluppo dei corridoi di rete. In particolare, per ogni piano di lavoro dei corridoi, la Commissione può adottare atti di esecuzione vincolanti per gli Stati membri interessati. Ciò dovrebbe consentire di stabilire scadenze e condizioni specifiche per lo sviluppo dei corridoi. La proposta prevede inoltre la possibilità per la Commissione di adottare atti di esecuzione per tratte specifiche dei corridoi, in particolare per quelle transfrontaliere complesse, o per requisiti specifici delle infrastrutture di trasporto.

La Commissione Europea dovrebbe elaborare una revisione del quadro normativo per il **trasporto ferroviario**, per rimuovere gli ostacoli normativi esistenti, in modo che possa essere un'alternativa competitiva al trasporto solo su strada. In particolare, sono necessarie disposizioni sulla gestione della capacità per rispondere meglio alle esigenze dei servizi di trasporto e per regolamentare le norme tecniche e operative che attualmente sono nazionali.

Nell'istogramma in Figura 34 sono indicati i corridoi europei con le percentuali di utilizzo della tecnologia ERTMS e di sistemi globali che garantiscono l'interoperabilità.

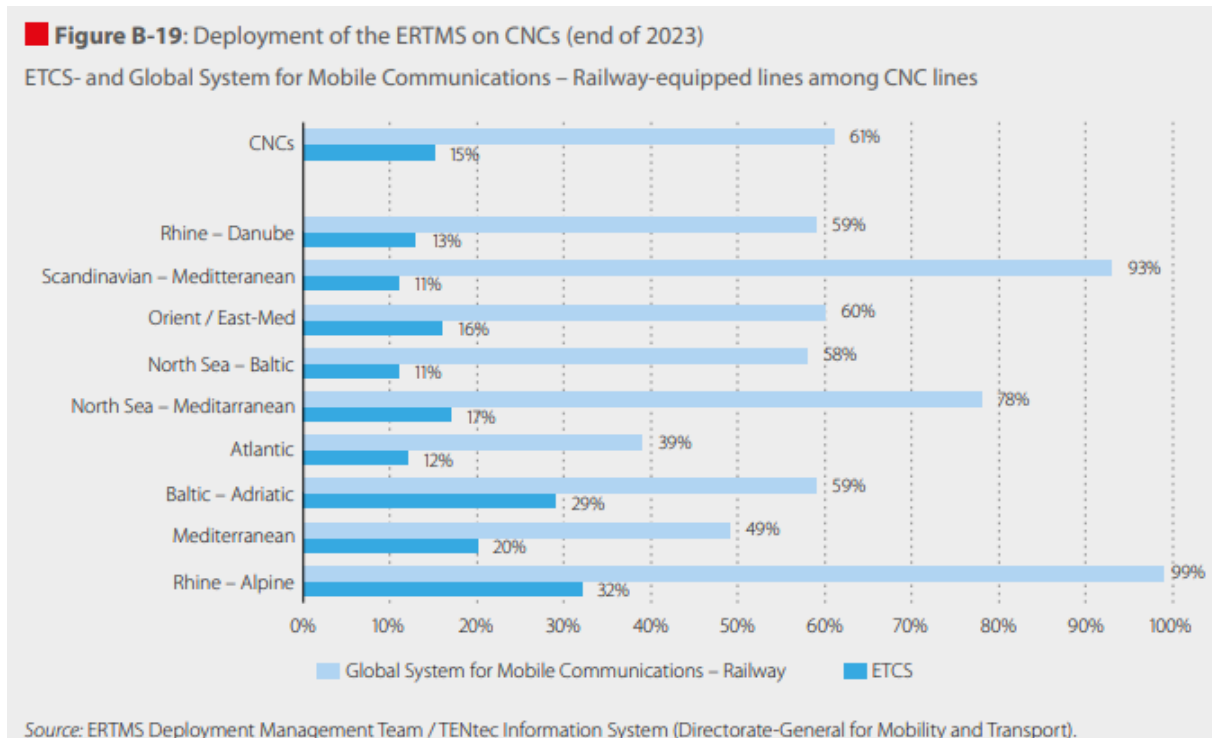


Figura 34- Corridoi ferroviari europei

La tecnologia ERTMS promuove l'innovazione nel settore ferroviario.

Il 5 gennaio 2017, la Commissione Europea ha adottato un Regolamento di esecuzione che stabilisce il nuovo sistema europeo ERTMS Piano di distribuzione (EDP). L'EDP prevede che circa il 40% dei corridoi della rete centrale siano dotati di ETCS entro il 2025 (15.672 km). Tuttavia, questo obiettivo sarà difficile da raggiungere. Infatti, sebbene **l'ERTMS sia vitale per un sistema ferroviario europeo efficiente in quanto può aumentare la capacità dal 30 al 40%**, ad aprile 2020 solo il 12% dei corridoi della rete centrale era in funzione con ETCS (ovvero 6.120 km) e il 63% dei corridoi della rete centrale con GSM-R. È importante notare che le apparecchiature di bordo possono essere ridotte fino al 70% con l'ultima versione di ERTMS, con importanti risparmi su rinnovo, manutenzione e affidabilità promossa. L'implementazione di ERTMS sarà accelerata con decisione insieme alle specifiche, allo sviluppo e alla dimostrazione dei game changer ERTMS. Infine, ERA agirà come una forte

autorità di sistema per ERTMS, anche con l'obiettivo di proteggere gli investimenti attraverso una modularità migliorata.

Questo aumento di capacità delle linee ferroviarie può essere ulteriormente migliorato insieme al risparmio energetico con Funzionamento automatico dei treni (ATO). Insieme a treni più leggeri e un fattore di carico più elevato, la tecnologia ATO può portare a risparmi energetici tra il 20% e il 50%. Inoltre, ATO insieme all'implementazione di ERTMS/ETCS ridurrà i costi operativi per le imprese ferroviarie e i costi di manutenzione per i gestori delle infrastrutture, migliorando ulteriormente la puntualità. **Investire in questa tecnologia è fondamentale per rendere il rinascimento ferroviario un successo.**

Oltre all'interoperabilità della linea ferroviaria europea, l'UE si sta occupando anche del concetto di capacità delle linee. I membri della commissione Trasporti (TRAN) del Parlamento europeo hanno adottato all'unanimità la relazione dell'on Tilly Metz sulle nuove norme che stabiliscono le condizioni per la pianificazione e l'allocazione della capacità delle infrastrutture ferroviarie nell'UE.

L'obiettivo è evitare congestioni e ritardi alle frontiere, conferendo maggiori poteri alla Rete Europea dei Gestori delle Infrastrutture (ENIM) per coordinare la capacità e il traffico transfrontaliero.

La pianificazione della capacità delle infrastrutture ferroviarie sarà divisa in tre fasi:

- **pianificazione strategica (quinquennale);**
- **programmazione (annuale);**
- **adattamento**

La TRAN suggerisce poi di istituire una Piattaforma Ferroviaria Europea composta da imprese ferroviarie, che includerebbe il punto di vista di operatori, porti o proprietari di servizi correlati al trasporto ferroviario nella pianificazione e distribuzione della capacità.

I membri della commissione Trasporti chiedono che i diversi strumenti digitali, come la visualizzazione dei piani di capacità o la segnalazione digitale degli incidenti, siano implementati dalla metà del 2025 alla fine del 2030, sotto il coordinamento dell'Agenzia ferroviaria europea.

Anche per il Governo italiano è caldo il tema dell'interconnessione con gli altri Paesi europei attraverso le linee ferroviarie. Infatti, le ferrovie italiane detengono un primato a livello

continentale, quello di aver **adottato per prime su una linea ferroviaria il nuovo sistema di segnalamento** europeo ERTMS/ETCS. Nel 2005 venne aperta all'esercizio la Roma-Napoli ad alta velocità e fu una scelta coraggiosa quella di affidarsi alla nuova tecnologia senza mantenere, neppure per precauzione, il doppio segnalamento. La nuova strada era stata tracciata, e quello italiano rappresentava un modello concreto esportabile in tutta Europa.

A distanza di quasi vent'anni però molte aspettative sono andate deluse sia per i ritardi nell'aggiornare la rete ferroviaria europea, sia per il fatto che a dispetto delle premesse, molte amministrazioni ferroviarie europee sono **andate in ordine sparso**. Una tecnologia scelta proprio con lo scopo di superare le differenze nazionali e favorire in concreto l'interoperabilità ferroviaria europea, ha dato vita non a un unico linguaggio, ma a parlate se non addirittura a dialetti diversi.

L'ERTMS come sistema unico europeo resta ancora **un obiettivo tutt'altro che raggiunto**.

Attualmente in Europa sono stati **adottati quattro livelli diversi di ETCS**, tre linee guida (Baseline) e oltre un centinaio di diverse compatibilità di sistema (Esc). Ad esempio, la Svizzera e il Belgio hanno adottato l'ETCS L1 (level 1, che mantiene i segnali tradizionali), costringendo l'Italia a seguire questa strada sui valichi di confine con la Confederazione elvetica. Altri paesi europei, tra cui anche l'Italia (per prima con la Roma-Napoli), hanno scelto fin da subito lo standard di livello 2.

Come si può comprendere, alla base di questo aggiornamento disordinato, c'è la **mancanza di un'unica vera regia** a livello europeo che faccia da coordinamento e imponga standard uguali per tutti [17].

3.2 Fattore Economico

L'innovazione del modello di business consiste nel mettere in discussione le abitudini di un settore. L'innovazione spesso comporta una radicale modifica degli attributi o del loro livello.

Il trasporto ferroviario è intrinsecamente complesso dal punto di vista economico, con:

- un mix di beni pubblici e privati; funzioni commerciali e di servizio pubblico; operazioni pubbliche e private;
- un equilibrio mutevole tra funzionalità tecnica, operativa e commerciale;
- flussi finanziari complessi. Per minimizzare la "**valle della morte dell'innovazione**" è necessaria una scelta ottimizzata tra progetti ferroviari innovativi. Ciò significa che la fattibilità

economica di ogni progetto selezionato deve coprire non solo i rischi tecnologici, ma anche i rischi finanziari derivanti dalla complessità del sistema ferroviario.

La globalizzazione economica dovrebbe facilitare l'introduzione di nuove reti e tratte ferroviarie (a condizione che venga attuata una standardizzazione globale).

Rispetto alle attività fisse, è più facile attrarre finanziamenti per le attività ferroviarie mobili. Questo è un incentivo in alcuni casi a utilizzare l'innovazione per ridurre i costi infrastrutturali trasferendo la funzionalità alle attività mobili (ad esempio localizzazione a bordo per evitare circuiti di binario/contatori di assi, elettrificazione discontinua più accumulo di energia a bordo per evitare di ricostruire ponti e gallerie).

Il trasferimento del potere economico dalle economie occidentali consolidate e dal Giappone alle economie emergenti dell'Est è destinato a continuare.

Dopo un calo del prodotto interno lordo (PIL) del 6% nel 2020 a causa della crisi del COVID-19, l'economia dell'UE ha registrato una ripresa con un +5% crescita del PIL nel 2021. Considerando i piani di ripresa nazionali ed europei, l'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico (OCSE) prevede ulteriori crescite del PIL dell'UE rispettivamente del 4,3% nel 2022 e del 2,5% nel 2023. Sfortunatamente, è probabile che l'attuale conflitto tra Ucraina e Russia abbia un impatto negativo sull'economia mondiale e dell'UE, almeno nel breve e medio termine. L'elevato tasso di dipendenza energetica dell'UE (60,7% nel 2019), in cui nessuno degli Stati membri è autosufficiente per soddisfare il proprio fabbisogno energetico, richiede azioni coraggiose da parte dell'UE per migliorare l'efficienza energetica e sviluppare fonti di energia rinnovabili. **Uno spostamento modale verso la ferrovia non solo aiuterà a ridurre il consumo di energia a livello globale, ma limiterà anche la dipendenza energetica nel contesto geopolitico dal petrolio.** L'attuale forte impatto della dipendenza dell'UE dai combustibili fossili stranieri richiede un urgente ed efficace spostamento modale verso la ferrovia.

I trasporti svolgono un ruolo importante nell'economia: spostano persone e merci, collegano territori, forniscono occupazione ma contribuiscono anche al riscaldamento globale dal punto di vista ambientale. I trasporti nell'UE rappresentano circa 10 milioni di persone direttamente impiegate e circa il 5% del PIL.

Sebbene la ferrovia sia ecologica rispetto alla strada, la sua quota di mercato è ancora molto bassa. Nel 2019, la ferrovia rappresentava il 17,6% del trasporto merci interno dell'UE e la

strada il 76,3%. Poiché i prezzi dell'energia continueranno ad aumentare, la mobilità continuerà a costare di più: il trasporto di massa, il trasporto pubblico e la mobilità condivisa sono mezzi per ridurre i costi della mobilità.

I principali risultati dello studio sul mercato ferroviario mondiale 2020 evidenziano che nel 2019 l'industria ferroviaria ha raggiunto un volume di mercato di 177 miliardi di euro (dalla metropolitana urbana al trasporto merci commerciale). Si prevede che il mercato si svilupperà positivamente nel medio e lungo termine, con un tasso di crescita medio annuo del 2,3% fino al 2025, e che **il volume totale del mercato raggiungerà i 204 miliardi di euro entro il 2025**.

Attualmente gli investimenti dell'Unione Europea mostrano interesse nella ricerca e sviluppo. Circa 780 milioni di Euro all'anno sono investiti nei sistemi di controllo ferroviari.

Il piano Shift2Rail che si occupa di ricerca nell'ambito ferroviario prevede un budget complessivo di 920 milioni di Euro di cui metà finanziati dal programma dell'Unione Europea Horizon2020. Questi investimenti e le ricerche che da essi deriveranno hanno l'obiettivo di integrare nuove tecnologie con prodotti ferroviari. Questo è mostrato in Figura 35, e va evidenziato l'investimento europeo nel settore ferroviario che ammonta al 2,7% del fatturato annuale [18].

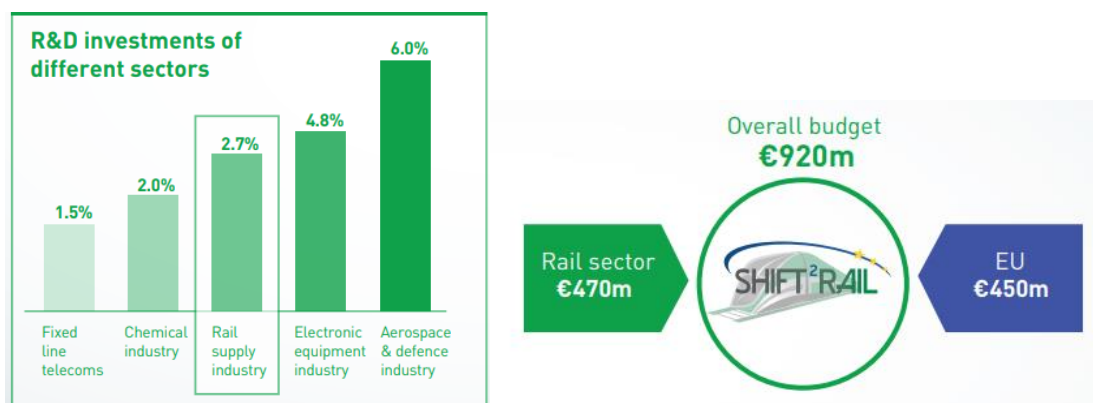


Figura 35- Investimenti dell'Unione Europea nelle tecnologie innovative del settore ferroviario

Nello specifico, l'Europa si sta concentrando su investimenti nella tecnologia ERTMS. I corridoi europei dovranno essere attrezzati entro il 2030 con la tecnologia, mentre l'intero collegamento TEN-T europeo dovrà essere attrezzato entro il 2050. Attualmente soltanto il 9,5% dei corridoi centrali sono attrezzati con tecnologia ERTMS, mentre la restante percentuale deve essere completata con un totale di 15-25 miliardi di Euro necessari.

L'Italia è uno dei primi Paesi ad adottare la tecnologia ERTMS. La valutazione tecnico-economica effettuata da RFI [sulla scorta dei dati raccolti nel proprio database Inrete2000 usato per le attività di manutenzione, dello studio commissionato alla società Ernest&Young (EY) dalla Commissione europea nel 2015 con riferimento ai corridoi RALP e NSM, nonché dell'analisi costi/benefici svolta dall'Università Bocconi di Milano nell'ambito del progetto ERSAT per l'applicazione della tecnologia satellitare] evidenzia che **l'introduzione di ERTMS sulla rete convenzionale consente una diminuzione dei costi di manutenzione del segnalamento** rispetto al sistema nazionale e determina un business case positivo a livello di intero sistema ferroviario tanto maggiore quanto più la migrazione ad ETCS a terra è accompagnata da un piano di dismissione della tecnologia preesistente. Inoltre un programma di dismissione del sistema nazionale di segnalamento, opportunamente graduato nel tempo per consentire la progressiva conversione dei sistemi di segnalamento di bordo, è necessario per **limitare i sovra costi manutentivi di due sistemi di segnalamento sovrapposti**. In particolare, l'analisi svolta ha evidenziato i seguenti aspetti:

- Avendo in esercizio sulla rete RFI sia linee AV con ETCS L2 senza segnali luminosi, sia una linea AV con segnali luminosi e protetta con il sistema nazionale SCMT+BAcc, sono stati confrontati gli oneri di manutenzione ordinaria (MO) inerenti ai due sistemi di protezione della marcia. Dai risultati è emerso che nel computo totale delle ore di manutenzione sulle tratte oggetto di analisi il contributo della manutenzione correttiva pesa meno per ETCS (30% circa) rispetto a SCMT (50% circa). Questo può trovare giustificazione anche nel minor numero di componenti necessari al sistema ETCS per proteggere la marcia. Inoltre, è risultato che in termini di ore di manutenzione, normalizzato per km, le ore totali di manutenzione di ETCS sono 1/4 di quelle richieste da SCMT.

Tenuto conto di un costo medio pari a 100 €/ora per gli oneri di manutenzione (inclusivi di costi uomo, componentistica di ricambio, riconfigurazione e costi legati ai disservizi arrecati dai guasti), RFI ha stimato che i costi medi a chilometro per anno nel caso dei sistemi di classe A e B sono:

ERTMS L2 – Classe A	SCMT – Classe B
600 € / Km anno	2.400 € / Km anno

Tabella 6- Confronto costi di manutenzione ERTMS L2- SCMT

Le attività di manutenzione straordinaria sul segnalamento esistente fanno parte di un programma di investimenti già avviato, parallelo e propedeutico a quello dell'ERTMS. Questo programma prevede anche il rinnovo di apparati di stazione elettronici e dei posti centrali, rappresentando elementi fondamentali per la realizzazione a basso costo di ETCS L2 o L3.

Sono stati analizzati anche i fattori che determinano gli oneri gestionali per i due sistemi:

– **Gestione doppia delle modifiche.** Gli interventi di manutenzione effettuati singolarmente su uno dei due sistemi, malgrado questi siano completamente disaccoppiati relativamente alle proprie funzionalità, hanno un riflesso perturbativo ed economico sugli oneri manutentivi gestionali e di riconfigurazione anche dell'altro, sia per il fatto che utilizzano alcuni componenti hardware comuni (boe, encoder e GSM-R), sia perché ogni modifica necessaria ad enti o al layout di stazione o di linea o ad apparati (ACEI o ACC) a cui i due singoli sistemi fanno comune riferimento, richiede poi un doppio intervento di riconfigurazione, verifica di non regressione, di ricertificazione e di messa in servizio su entrambi i sistemi di sicurezza.

SCMT ed ERTMS Livello 2/3 hanno, inoltre, una differente concezione architeturale. L'ERTMS L2/3 massimizza la concentrazione delle informazioni sia di linea che di stazione sotto la giurisdizione di un Database del Radio Block Center, mentre l'SCMT, distribuisce sul territorio le sue apparecchiature e le relative informazioni. Ciò comporta che una modifica locale per SCMT richiede una ricertificazione solo locale, mentre per ERTMS Livello 2 o Livello 3 richiede una ricertificazione completa del Database del Radio Block Center. **Tale differente architettura determina quindi costi di Progetto, Verifica, Validazione, Certificazione e Messa in servizio delle due tipologie di modifiche** su singolo ente distribuito di SCMT e su Radio Block Center al posto centrale di ERTMS che, tra costi diretti ed indiretti, differiscono anche di un fattore di scala 10 a sfavore di ETCS. Stimando un intervento all'anno ogni 200 km per modifiche di applicazione specifica (riconfigurazione) per uno dei due sistemi o per uno degli apparati di stazione, i costi medi di progettazione, verifica, validazione, valutazione da parte del NoBo, corse prova, certificazione e MIS sul sistema ETCS, anche

quando indotti dalla modifica di un altro sistema, sono stimabili in modo conservativo e come media in € 70.000, quindi 350 €/km all'anno.

– **Gestione dei Rallentamenti.** La gestione dei rallentamenti fatti in SCMT necessita, in aggiunta ai relativi 3 cartelli di avviso, inizio e fine rallentamento, dell'utilizzo di almeno 6 boe per binario, prima da programmare a cura di personale dedicato e poi da posare a cura delle squadre specializzate, quindi successivamente da rimuovere sempre in modalità di interruzione della linea. L'ERTMS livello 2/3 utilizzando, invece, la modalità centralizzata via radio di istituzione e rimozione rallentamenti, non ha costi. Considerando mediamente l'istituzione di cinque rallentamenti l'anno su una tratta di 200 km, i costi medi interni complessivi in termini di istituzione e rimozione del rallentamento SCMT sono stimabili in € 4.000 a rallentamento, incluso ore uomo, costi interruzione e materiali, quindi 100 €/km all'anno.

In conclusione, la proiezione di tali stime di costi manutentivi ordinari, straordinari e gestionali, in relazione alla capacità realizzativa di ETCS sulla rete e di opportunità di coesistenza temporanea dei due sistemi, costituisce elemento fondamentale per la definizione del criterio di progressiva dismissione del sistema nazionale SCMT.

3.3 Fattore Sociale

Nell'ambito del suo Obiettivo “Rendere le città inclusive, sicure, resilienti e sostenibili”, l'ONU ha presentato i seguenti dati:

- Metà dell'umanità, ovvero 3,5 miliardi di persone, vive, oggi, nelle città e si prevede che entro il 2030 saranno 5 miliardi le persone che vivranno in città.
- Si prevede che entro il 2050 il 70% della popolazione mondiale vivrà in insediamenti urbani.
- Si prevede che nei prossimi 30 anni il 90% della crescita urbana avverrà in Asia e Africa.
- Le città del mondo occupano il 3% del territorio terrestre, ma sono responsabili del 60-80% del consumo energetico e del 75% delle emissioni di carbonio.

Entro il 2050, la popolazione urbana potrebbe raggiungere i 9 miliardi. Le città stanno funzionando sempre più autonomamente, stabilendo nuovi standard sociali ed economici. Le città del futuro avranno bisogno di più trasporti pubblici, di più spostamenti attivi, di più modalità alternative e di tempi di percorrenza ridotti. Con un numero sempre maggiore di persone che vivono in aree densamente popolate, è probabile che la capacità delle strade e le

limitazioni dei parcheggi scoraggino l'uso dell'auto e diventi anche più facile migliorare l'accesso e la frequenza dei trasporti pubblici. È chiaro che la crescente sensibilità dei cittadini dell'UE per le questioni ambientali, tra cui l'uso del suolo, unita alla crescente congestione del traffico, porta ad allontanarsi dalla visione di fine XX secolo secondo cui l'auto privata era la soluzione a quasi tutte le esigenze di trasporto.

Durante il summit Grand Paris del 2021, fino al 40% dell'occupazione è stata considerata incline al telelavoro, con due o tre giorni di telelavoro a settimana. Ciò è stato percepito come una probabile causa del calo del numero di passeggeri del trasporto pubblico.

Negli ultimi decenni, l'invecchiamento della popolazione è stato osservato in tutta l'UE.

L'ingresso nel mondo del lavoro e la maggiore durata delle generazioni più anziane stanno cambiando l'occupazione, i modelli di carriera e le strutture organizzative. Le aree remote e scarsamente popolate soffrono di accessibilità ai trasporti. I governi hanno approcci diversi per il processo decisionale sulla fornitura di trasporti per le aree remote. Uno studio dell'International Transport Forum (ITF) raccomanda di:

- sviluppare piani di accessibilità integrati per collegare i trasporti e i servizi di base;
- sostenere innovazioni che potrebbero ridurre i costi o migliorare la qualità del servizio.

L'avvento delle nuove tecnologie sulle linee ferroviarie che hanno migliorato la capacità, hanno aumentato la velocità e garantiscono le interconnessioni tra Paesi europei, ha portato molteplici benefici. In Figura 36, si nota un confronto tra il periodo precedente all'avvento delle innovazioni e quello seguente, evidenziando l'aumento della richiesta degli spostamenti ferroviari rispetto a quelli stradali e aerei. Nella tratta Parigi-Bruxelles, è preferibile utilizzare i trasporti ferroviari perché la distanza è tale da rendere indifferente l'uso dell'aereo o del treno in termini di tempi impiegati per lo spostamento.

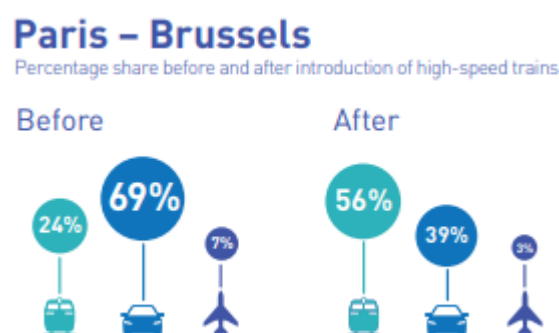


Figura 36- Confronto tra mezzi di trasporto prima e dopo l'introduzione di innovazioni

3.4 Fattore Tecnologico

Le innovazioni infrastrutturali saranno relativamente più lente e conservative, a causa del lungo ciclo di vita delle risorse ferroviarie. La maggior parte delle tecnologie considerate potrebbero migliorare le prestazioni delle ferrovie ma allo stesso tempo anche di altri settori dei trasporti. Per quanto riguarda la velocità relativa dell'innovazione, si ritiene che le tecnologie abilitanti convergano e accelerino ulteriori innovazioni, ad esempio l'intelligenza artificiale (IA), che è strettamente legata a molti sviluppi di ricerca e innovazione. Poiché il trasporto ferroviario opererà all'interno di un mercato della mobilità e della logistica sempre più ampio e interconnesso, sarà influenzato dalla relativa velocità di adozione delle innovazioni da altre modalità di trasporto. Ad esempio, per l'automazione del settore ferroviario, saranno necessari importanti adattamenti e investimenti nell'intera rete (altamente interconnessa). Sono previste diverse innovazioni/iniziative dell'UE in corso, in particolare per dare impulso al trasporto merci su rotaia nell'UE. Il piano di lavoro dell'ERTMS sottolinea che l'implementazione della tecnologia, sia a terra che a bordo, deve essere accelerata con un forte supporto da parte degli Stati membri dell'UE in tutta la rete ferroviaria europea entro il 2030, non solo sui corridoi della rete centrale (CNC). Il rapporto finale della CE sulla strategia di retrofitting dell'ERTMS, Funding and Financing, mostra che è più difficile per le imprese ferroviarie dimostrare un business case positivo, creando un collo di bottiglia per l'implementazione complessiva.

Le seguenti tecnologie in via di sviluppo potrebbero avere un impatto sui trasporti e sulle ferrovie:

- Monitoraggio, controllo, automazione dei processi (industriali),
- L'intelligenza artificiale considerata l'acceleratore della quarta rivoluzione industriale;
- Ruolo crescente delle auto automatizzate, che saranno meglio connesse grazie a una copertura più uniforme attraverso i satelliti
- Soluzioni di trasporto innovative, ad esempio veicoli a guida autonoma, Hyperloop.

Dal rapporto scientifico UNESCO 2021 "La corsa contro il tempo per uno sviluppo più intelligente" è giunta alle seguenti conclusioni.

– Parallelamente, i paesi di tutti i livelli di reddito stanno dando priorità alla transizione verso economie digitali e "verdi".

- I paesi dovranno investire di più in ricerca e innovazione, se vogliono avere successo nella loro duplice transizione digitale e verde. Più di 30 paesi hanno già aumentato la loro spesa per la ricerca dal 2014.
- Poiché il settore privato guiderà gran parte di questa duplice transizione verde e digitale, i governi si sono impegnati a facilitare l'innovazione del settore privato attraverso nuovi strumenti politici, come gli hub di innovazione digitale, in cui le aziende possono "testare prima di investire" nelle tecnologie digitali.
- La pandemia di COVID-19 ha portato a una maggiore collaborazione scientifica internazionale.

La spesa per Ricerca e Sviluppo per il 2022 è stata del 2,24% rispetto al 2,41% della Cina, al 3,34% del Giappone, al 3,46% degli Stati Uniti e al 4,93% della Corea. Ciò dimostra che l'UE deve mantenere la sua posizione nella corsa tecnologica globale. Il panorama industriale sta cambiando con più software ed elettronica in molti prodotti e/o processi. I trasporti e il trasporto ferroviario sperimentano la stessa evoluzione. La continua trasformazione digitale con cloud, cloud multipli, metaverso e analisi dei dati richiede nuovi framework, mentalità e talenti. Con l'aumento della connettività, il volume di dati disponibili sta diventando uno strumento estremamente prezioso per molti attori: produttori, operatori, assicuratori, aziende tecnologiche, fornitori di servizi di mobilità, autorità e molti altri.

Uno studio McKinsey del 2021 prevede tra l'altro le seguenti tendenze:

- Entro il 2025 il 50% dell'attività lavorativa attuale potrebbe essere automatizzata;
- entro il 2030, fino all'80% della popolazione mondiale potrebbe essere raggiunta dalla copertura 5G;
- entro il 2025 oltre il 75% dei dati generati dalle aziende sarà elaborato tramite edge o cloud computing;
- nel 2050 oltre il 75% dell'energia mondiale sarà prodotta da fonti rinnovabili. Un rapporto

Secondo un articolo di McKinsey del 4 febbraio 2024, si prevede che le seguenti tendenze tecnologiche plasmeranno il settore della mobilità: connettività avanzata, AI applicata...

Sebbene la ferrovia sia un mezzo ecologico, sono ancora necessari miglioramenti in termini di efficienza energetica e di emissioni di carbonio. La lunghezza totale della rete ferroviaria UE-

27 nel 2018 era di circa 201.000 km di linea, di cui circa il 56% era elettrificato. Si prevede che l'elettificazione della rete ferroviaria europea continuerà.

Il rapporto del JRC 2021 sulla ricerca e l'innovazione nel trasporto ferroviario in Europa è giunto alle seguenti conclusioni: dei 526 progetti in modalità di trasporto ferroviario in TRIMIS, il numero più elevato di progetti è correlato alle roadmap della Strategic Transport Research and Innovation Agenda (STRIA). Le organizzazioni dei cinque paesi più attivi (Germania, Spagna, Francia, Italia e Regno Unito) attraggono quasi il 75% del contributo totale dell'UE destinato ai progetti di R&I ferroviaria.

Tra le prime 20 tecnologie ferroviarie ricercate, otto sono collegate alla ferrovia. Le 5 tecnologie più finanziate (superiore a 50 milioni di euro) sono: ecosistema logistico collaborativo; sensori intelligenti per l'autodiagnosi e organi di rotolamento intelligenti; strumenti di supporto alle decisioni per la gestione delle infrastrutture; carri più efficienti; istruzione e ricerca nel settore ferroviario.

I progetti di ricerca e innovazione nel campo del trasporto ferroviario sono stati suddivisi in sei sottotemi, di cui uno relativo ai sistemi di segnalamento che comprende **ricerche che spaziano dai sistemi di segnalamento e automazione ferroviaria, ai sistemi di alimentazione intelligenti, al rilevamento degli ostacoli e ai test realistici dei componenti del sistema europeo di controllo del traffico (ETCS).**

Il numero di pubblicazioni accademiche relative alle ferrovie è in aumento. Come osservazione generale, negli ultimi anni la Cina sembra dominare i risultati scientifici nella ricerca sul trasporto ferroviario. Tuttavia, la performance dell'Europa è forte: combinando il record di pubblicazioni di tutti i 27 paesi membri (UE-27) dell'UE, per la maggior parte dei sottotemi l'UE è l'entità leader.

Si possono fare alcune considerazioni finali in merito alla strada da seguire nella **ricerca e innovazione (R&I) ferroviaria**. Diversi progetti di R&I Shift2Rail del piano di lavoro annuale e del bilancio 2020 sono iniziati a dicembre 2020, con risultati attesi nel 2021 e oltre. Si prevede che **Europe's Rail si concentrerà sull'innovazione digitale e sull'automazione per realizzare la radicale trasformazione del sistema ferroviario necessaria per raggiungere gli obiettivi del Green Deal europeo.**

Il progetto EU Flex-Rail ha indagato le seguenti aree:

- Tecnologie abilitanti e innovazioni generali;
- Materiali innovativi, nanomateriali, intelligenza artificiale, sensori, reti mobili 5G, protezione dei dati (privacy e sicurezza informatica);
- Tecnologie legate all'energia: batterie, celle a combustibile, unità di potenza (sistemi di propulsione alternativi), aerodinamica.
- **Automazione del sistema di trasporto: treni autonomi, cambio automatico dello scartamento, manutenzione automatizzata, veicoli connessi, platooning, prevenzione delle collisioni, registratori di dati di eventi, automazione portuale.**
- Nuove modalità e concetti di trasporto, nuove modalità ferroviarie, hyperloop, trasporto rapido personalizzato, treni merci ad alta velocità.

L'attuale contesto tecnologico si sta evolvendo in una serie di sistemi condivisi, con effetti di rete di cui è necessario tenere conto e che devono essere gestiti utilizzando, ove necessario, standard e normative.

3.5 Fattore Ambientale

Secondo il rapporto IPCC del 2021, il cambiamento climatico sta già influenzando ogni regione abitata del mondo. Il riscaldamento globale di 1,5°C e 2°C sarà superato nel corso del 21° secolo, a meno che non si verifichino profonde riduzioni delle emissioni di CO₂ e di altri gas serra nei prossimi decenni.

L'unica fonte di emissioni di gas serra ad aumentare tra il 1990 e il 2018 è stata il trasporto (fino al 31,8%). Per avere successo, le politiche di riduzione delle emissioni di carbonio devono essere allineate con la pianificazione dell'uso del territorio (ad esempio, l'interazione della logistica del trasporto merci con le zone ad aria pulita) e con la riduzione delle disuguaglianze sociali (crescita inclusiva).

La decarbonizzazione dei trasporti è inscindibile dagli sviluppi in altri settori. In particolare, la mobilità sostenibile va di pari passo con la produzione di energia pulita. Sebbene il trasferimento modale abbia un ruolo specifico nel breve termine per combattere le emissioni di carbonio, è necessaria anche la decarbonizzazione del trasporto pubblico, attraverso la decarbonizzazione della flotta di autobus e taxi, l'offerta di nuovi servizi e investimenti nelle ferrovie. Le tasse ambientali possono essere utilizzate per cercare di influenzare il comportamento degli operatori economici, sia produttori che consumatori. Nel 2019, le entrate

fiscali ambientali dell'UE sono state valutate a 330,6 miliardi di euro, equivalenti al 2,4% del PIL. Dai dati UE-28 del 2016, il trasporto su strada è il principale responsabile dei costi esterni, 83% dei costi totali, 820 miliardi di euro, mentre il trasporto ferroviario ammonta a soli 18 miliardi di euro.

Come evidenziato in Figura 37, l'utilizzo di un treno permette di ottimizzare il trasporto rispetto ad autobus e automobili. Questo evidenzia il concetto di capacità sul quale si concentrano le imprese del settore ferroviario e gli obiettivi dell'Unione Europea.

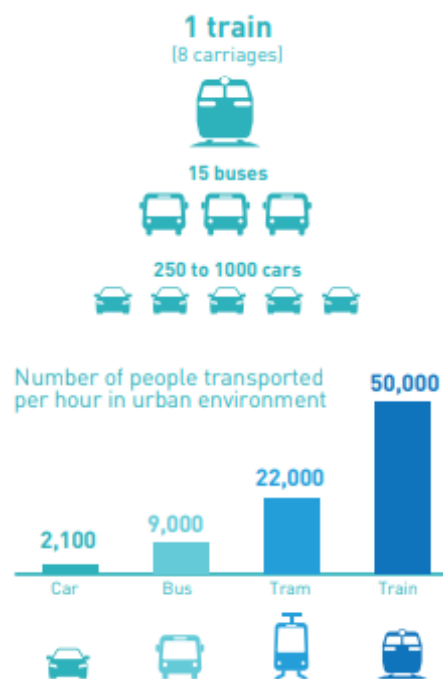


Figura 37- Confronto dei mezzi di trasporto rispetto alla capacità

Negli anni, gli interventi delle imprese e le innovazioni tecnologiche sulle linee ferroviarie hanno permesso di ridurre le emissioni di CO2 come mostrato negli istogrammi in Figura 38. Infatti, le emissioni in grammi su persone al chilometro, corrispondenti ai treni per trasporto persone, si sono ridotte del 24%.

Development of relative EU rail CO₂ emissions

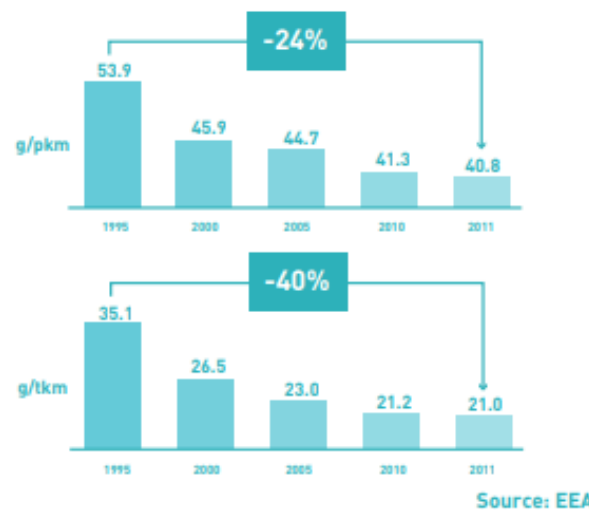


Figura 38- Emissioni per treni merci e per treni per il trasporto di persone dagli ultimi anni '90 al primo decennio del 2000

Esiste un ampio corpus di ricerche sugli impatti dei gas serra delle infrastrutture ferroviarie, sebbene l'ambito differisca in termini di componenti considerate e fasi del ciclo di vita valutate. La Figura 39 riunisce elementi di vari studi di ricerca che mostrano gli elementi chiave da considerare quando si valutano gli impatti dei gas serra sulle infrastrutture ferroviarie.

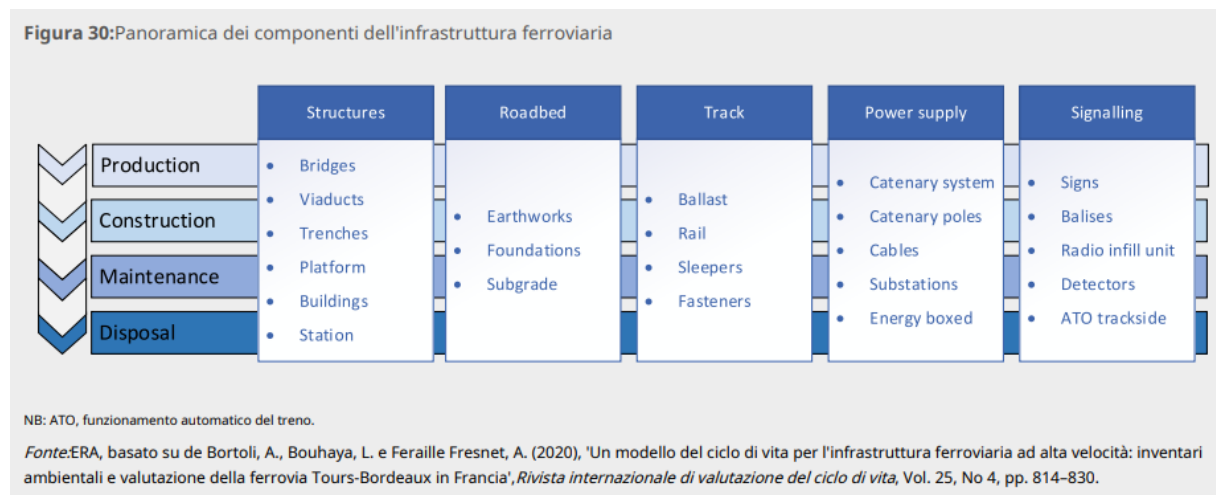


Figura 39- Componenti ferroviarie che influenzano le emissioni di gas serra

Ogni elemento dipende dalle materie prime (ad esempio cemento, acciaio e rame) che vengono estratte e prodotte prima della fase di costruzione. La sfida nella valutazione degli impatti dei gas serra risiede nel fatto che le materie prime possono provenire da tutto il mondo.

Le emissioni annuali di gas serra dipendono dalla durata economica delle costruzioni, ma questi valori variano notevolmente da un paese all'altro. La valutazione degli impatti dei gas serra delle infrastrutture esistenti è complicata dal fatto che le infrastrutture ferroviarie sono state costruite sin dal XIX secolo, richiedendo diversi livelli di manutenzione e di rinnovamento. È anche importante considerare che grandi quantità della rete ferroviaria sono già state rimosse, poiché la rete ferroviaria europea è stata notevolmente accorciata. Un'analisi delle statistiche storiche delle linee ferroviarie su 20 paesi europei mostra che almeno 72.000 km di linee sono stati rimossi dalla rete dal 1960. Mentre nell'ultimo decennio la rimozione delle linee sembra essere diminuita, è importante considerare le **emissioni di gas serra coinvolte nel loro smaltimento**. I costi delle infrastrutture in termini di emissioni di gas serra hanno un impatto relativamente maggiore sul trasporto ferroviario rispetto ad altre modalità. Rendere più ecologiche le infrastrutture ferroviarie rimane quindi una parte importante per rendere le ferrovie più ecologiche [19].

3.6 Fattore Legale

La Comunità, prima, e l'Unione Europea, poi, hanno stabilito, attraverso i Libri bianchi, le linee guida relative all'intero sistema dei trasporti; successivamente hanno scorporato ciascuna rete al fine di poter operare nel dettaglio con interventi mirati sulla peculiarità di ogni linea.

Una serie di regolamentazioni si sono succedute, cercando di fornire soluzioni soddisfacenti in grado di garantire l'interoperabilità.

Il primo atto dell'allora Comunità Europea espressamente dedicato all'interoperabilità per il sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità, è la direttiva 96/48/CE17, spesso indicata esclusivamente come “la direttiva”. Fra le definizioni contenute nell'art. 2 è fondamentale il concetto di “specifica europea”, chiave di volta dell'intero sistema, indicata dalla lettera f) come «una specifica tecnica comune, un'omologazione tecnica europea o una norma nazionale che recepisca una norma europea, quali definite all'articolo 1, punti da 8 a 12 della direttiva 93/38/CEE». Altra nozione di grande importanza è quella di “specifiche tecniche di interoperabilità” (STI) identificate alla lett. g) come quelle «di cui è oggetto ciascun sottosistema, al fine di soddisfare i requisiti essenziali definendo relazioni funzionali reciproche necessarie tra i sottosistemi del sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità e assicurando la coerenza di quest'ultimo». Esse, come evidenziato dall'art. 4, hanno la funzione di

«completare le specifiche europee o le altre norme applicate nella Comunità», quindi «non devono essere in contrasto con i requisiti essenziali». L'art. 5 precisa che: «Le STI, ove necessario per realizzare l'interoperabilità del sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità:

- a) precisano i requisiti essenziali per i sottosistemi e le loro interfacce;
- b) fissano i parametri di base, descritti nell'allegato II, punto 3, necessari al soddisfacimento dei requisiti essenziali;
- c) fissano le condizioni da rispettare per effettuare le prestazioni per ciascuna delle categorie di linee seguenti: linee specialmente costruite per l'alta velocità; linee specialmente adattate per l'alta velocità; linee specialmente adattate per l'alta velocità e aventi caratteristiche specifiche a causa di vincoli topografici di rilievo o di ambiente urbano;
- d) fissano le eventuali modalità di applicazione in alcuni casi specifici;
- e) determinano i componenti di interoperabilità e le interfacce che devono essere oggetto di specifiche europee, tra cui le norme europee che sono necessarie per realizzare l'interoperabilità del sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità nel rispetto dei requisiti essenziali;
- f) indicano in ogni caso previsto i moduli, definiti nella decisione 93/465/CEE o, se del caso, le procedure specifiche da usare per valutare la conformità o l'idoneità all'impiego dei componenti di interoperabilità, nonché la verifica "CE" dei sottosistemi». L'art. 6 chiarisce che i progetti delle STI debbano essere elaborati su mandato della Commissione ad opera di un organismo rappresentativo comune, quello «composto di rappresentanti dei gestori dell'infrastruttura, delle aziende ferroviarie e dell'industria, incaricato di elaborare le STI».

L'efficacia delle disposizioni, tuttavia, non è perfettamente garantita in quanto l'art. 7 prevede una serie di deroghe rivolte agli Stati membri. Tali deroghe, insieme alla necessità di implementazione di ciascuna direttiva da parte di ogni Stato membro, minano le fondamenta di un sistema che, almeno in via teorica, risulterebbe maggiormente vincolato se avesse alla propria base un regolamento. Tuttavia, l'approvazione di un regolamento in tale ambito incontrerebbe numerose difficoltà, poiché gli Stati sono tradizionalmente restii nel deliberare normative vincolanti su argomenti che richiedono investimenti economici provenienti dalle proprie casse. **La direttiva 2001/16/CE18 ha provveduto ad estendere l'ambito di applicazione della direttiva interoperabilità precedente anche al sistema ferroviario europeo convenzionale al fine di permettere una migrazione sicura e senza difficoltà da una rete nazionale all'altra** anche nei casi in cui le linee non riguardino le strutture dell'alta

velocità; l'ambito è stato ulteriormente esteso all'intera rete ferroviaria europea con la direttiva 2004/50/CE19.

Le tre direttive sono state riunite in un unico testo comune con la direttiva 2008/57/CE, modificata nel 2008 e nel 2011, poi rifusa nella direttiva **2016/79720** che può essere considerata il punto di approdo conclusivo del percorso iniziato vent'anni prima ed è intitolata alla generalità dell'**interoperabilità ferroviaria nell'Unione Europea**.

Il quarto pacchetto ferroviario è un insieme di sei atti legislativi proposti dalla Commissione nel 2013 ed approvati congiuntamente tre anni dopo da Parlamento Europeo e Consiglio, con lo scopo di favorire la realizzazione di uno spazio ferroviario europeo unico. Il pilastro tecnico, adottato nell'aprile 2016, include, oltre alla direttiva 2016/797 sull'interoperabilità, la direttiva 2016/798 sulla sicurezza ed il regolamento 2016/79621 sull'Agencia dell'Unione Europea per le ferrovie. Essa si configura come «organismo dell'Unione dotato di personalità giuridica» (art. 3), concepito per fornire assistenza tecnica sia agli Stati membri sia alla Commissione nello sviluppo e nell'implementazione della “Single European Railway Area”.

Si delinea, inoltre, come autorità sull'“European Rail Traffic Management System”, il sistema comune di gestione, protezione e controllo del traffico ferroviario che, al fine di garantire l'interoperabilità del settore, sostituisce gli incompatibili sistemi nazionali. Il pilastro politico, datato dicembre dello stesso anno, è formato dalla cosiddetta “Direttiva Governance” 2016/2370, dal regolamento 2016/2338 sull'apertura del mercato dei servizi di trasporto ferroviario nazionale di passeggeri e dal regolamento 2016/2337 relativo alle norme comuni per la normalizzazione dei conti delle aziende ferroviarie.

La legge europea sul clima di luglio 2021 costituisce la base fondamentale per la politica dell'UE volta a raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 con la fase intermedia del 2030, in cui le emissioni di gas serra dovrebbero essere ridotte di almeno il 55% rispetto ai livelli del 1990. I trasporti svolgono un ruolo importante nel raggiungimento degli obiettivi dell'UE, in quanto si prevede che ridurranno le emissioni del 90% entro il 2050.

Molti rappresentanti del settore ferroviario dell'UE chiedono azioni politiche più coerenti per quanto riguarda le ferrovie, che includano la creazione di condizioni di parità, la presenza di una buona rete infrastrutturale su cui operare e la gestione della capacità considerata da una prospettiva internazionale. L'UIRR ha chiesto aspetti orizzontali quali la digitalizzazione o le

infrastrutture, nonché argomenti giuridici quali norme in materia di sicurezza, ambiente o tutela dei clienti, da affrontare nella legislazione orizzontale neutrale rispetto al modo di trasporto.

Uno studio UIC del 2023 del quadro normativo ferroviario dell'UE ha concluso che vi sono quattro sfide principali per il completamento dello spazio ferroviario europeo unico:

- divergenze nell’attuazione delle norme UE vigenti in materia di accesso alle infrastrutture e di determinazione dei prezzi;
- ostacoli ai servizi transfrontalieri;
- gestione della congestione;
- mancanza di incentivi per gli investimenti in infrastrutture e quindi tempi di implementazione

DOSSIER “CAPACITÀ DELL’INFRASTRUTTURA FERROVIARIA” (PARTE DEL PACCHETTO “SOSTENIBILITÀ DEL TRASPORTO MERCI) (18 giugno 2024) – Il 18 giugno il Consiglio Trasporti ha adottato la sua posizione negoziale sul nuovo regolamento relativo all’**uso della capacità dell’infrastruttura ferroviaria nell’area ferroviaria unica europea**.

Questo dossier legislativo fa parte del pacchetto “greening freight” della Commissione, che contiene anche le proposte su un sistema armonizzato per il conteggio delle emissioni dell’UE, la proposta sul peso e le dimensioni massimi per i veicoli pesanti e la revisione della direttiva sul trasporto combinato.

Il regolamento mira ad aumentare la disponibilità dell’infrastruttura ferroviaria attraverso processi di pianificazione e allocazione migliori, oltre a un miglior coordinamento transfrontaliero.

Il Consiglio ha mantenuto alcuni elementi della proposta della Commissione, ovvero:

- la definizione di migliori processi di pianificazione e allocazione, basati sul progetto “Timetable redesign” guidato dall’industria;
- l’incentivazione delle prestazioni e del coordinamento

Tuttavia, sono state introdotte alcune modifiche con i seguenti obiettivi principali tra cui, concedere agli Stati membri sufficiente flessibilità per definire obiettivi generali e orientamenti politici per la gestione della capacità ferroviaria, garantendo al contempo l’armonizzazione richiesta a livello dell’UE.

CONCLUSIONE

L'obiettivo dello studio è stato quello di definire qual è la tecnologia che emergerà nel futuro nel settore del segnalamento ferroviario. Sono state analizzate tutte le tecnologie presenti e quelle future, valutando le caratteristiche architettoniche e tecniche per evidenziare le differenze. Per raggiungere l'obiettivo finale sono stati eseguiti studi concentrandosi più nel dettaglio su due analisi: identificazione e studio degli indicatori di performance, e definizione del dominant design. Dall'analisi dei documenti dell'Unione Europea sugli obiettivi della mobilità 2030 sono emersi due aspetti fortemente correlati tra loro, uno gestionale e l'altro economico.

L'aspetto economico è stato valutato con gli investimenti dell'Europa per tecnologia, dal quale è emerso che gli investimenti nelle tecnologie SCMT ed SSC sono stati più alti ma al momento sono in ripida diminuzione, diversamente dalla crescita degli investimenti nell'ETCS L1 ma ancora di più dell'ETCS L2, che corrispondono allo standard a cui l'Europa vuole tendere, confermando quindi quanto emerge nei documenti ufficiali.

Dal punto di vista gestionale della linea, l'aumento di capacità richiesta è soddisfatto dalla tecnologia ETCS L1 perché più diffusa, ma è evidente una crescita anche per l'ETCS L2.

Anche il modello di Abernathy e Utterback ha confermato l'interesse maggiore verso la tecnologia ERTMS, sebbene dalla curva del tasso di innovazione sta emergendo anche la tecnologia ATO che ha come base della tecnologia ERTMS.

Il sistema ERTMS costituisce una rivoluzione "silenziosa" della sicurezza dei treni nell'esercizio del trasporto ferroviario, ci sono però ancora alcuni aspetti che frenano la sua diffusione. Innanzitutto, mancano conoscenze sufficienti in questo campo, ossia vi sono ancora poche persone esperte affinché possa essere adottata una visione digitale comune tra i diversi sistemi. La conseguenza è che nonostante la creazione dell'E.R.A. che è stata accompagnata da diverse ambizioni da parte dell'Unione per un'integrazione pressoché completa come avvenuto per esempio nel settore del trasporto aereo, gli Stati tendono ancora una volta a riferirsi ad una sicurezza dei treni che rimane dentro i confini nazionali e che ricalca le soluzioni abbracciate nel secolo precedente. L'Agenzia può pienamente funzionare nella direzione di uno sviluppo delle infrastrutture ferroviarie passando attraverso il monitoraggio da parte degli Stati e la partecipazione attiva dei Ministeri delle Infrastrutture e dei Trasporti, garantendo i seguenti fattori chiave: **interoperabilità, sicurezza, normative adeguate, investimenti e progetti, intermodalità.**

Nonostante il patchwork delle diverse legislazioni all'interno dell'Unione, deve essere comunque segnalato che c'è stato un miglioramento complessivo della sicurezza ferroviaria a livello europeo dal momento della sua creazione.

La mancanza di un sistema uniformato del trasporto ferroviario tra i diversi Stati Membri, pensando per esempio al sistema ERTMS, può essere dovuta anche ai costi molto elevati che dovrebbero essere impiegati per installare i nuovi sistemi tecnologici, oltre al fatto che Paesi come Germania e Austria presentano un sistema ferroviario molto forte quindi sono meno incentivati al cambiamento. L'Agenzia ha però richiamato l'attenzione sul fatto che anche la mancanza di sicurezza ferroviaria richiede l'impiego di costi.

L'elaborato riguarda le tecnologie del segnalamento ferroviario, sarebbe utile espandere questo studio verso altre tecnologie che garantirebbero la sicurezza delle linee, come ad esempio: la tecnologia con fibra ottica FOS, che manda un segnale a bordo treno sullo stato della linea; treni Hyperloop che garantiscono velocità e sicurezza; sistemi di cyber security per eventuali attacchi informatici della linea [20].

Bibliografia

- [1] “factsheet # 28 ® ERTMS ADVANTAGES.” [Online]. Available: www.ertms.net
- [2] M. Cantamessa and F. Montagna, *Management of innovation and product development: Integrating business and technological perspectives*. Springer-Verlag London Ltd, 2015. doi: 10.1007/978-1-4471-6723-5.
- [3] S. Unger *et al.*, “Securing the Future Railway System: Technology Forecast, Security Measures, and Research Demands,” *Vehicles*, vol. 5, no. 4, pp. 1254–1274, Dec. 2023, doi: 10.3390/vehicles5040069.
- [4] “INFRASTRUTTURE ANSFISA_Lusi”.
- [5] E. Romagna, “ERTMS/ETCS in RFI,” 2014.
- [6] D. Schiavoni, “Telecomunicazioni ferroviarie: prossimi passi verso FRMCS (5G) Convegno ‘Il progetto DInoS5G.’”
- [7] M. Erskine, D. Milburn, and M. Cpeng, “David Milburn, Mike Erskine Digital Train Control-Functional safety for AI based systems DIGITAL TRAIN CONTROL FUNCTIONAL SAFETY FOR AI BASED SYSTEMS,” 2019.
- [8] “*EP004032782A1*.”
- [9] Rahmig and Christian, “EGNSS for safety-critical railway applications-still a long way to go?” [Online]. Available: <http://www.ersat-eav.eu/>
- [10] “RAPPORTO ANNUALE 2024 TRASPORTO FERROVIARIO MERCI ITALIANO 9 APRILE 2024 SENATO DELLA REPUBBLICA SALA CAPITOLARE-ROMA.”
- [11] “Relazione speciale.”
- [12] E. Union Agency For Railways, “Report on Railway Safety and Interoperability in the EU - 2024,” 2024, doi: 10.2821/64343.
- [13] D. Guido. Rinoldi and Francesco. Rossi Dal Pozzo, *Il trasporto ferroviario nell’Unione Europea all’alba del terzo millennio*. Editoriale scientifica, 2020.
- [14] “REPORT Part 2-Freight Making the railway system work better for society. FOSTERING THE RAILWAY SECTOR THROUGH THE EUROPEAN GREEN DEAL PART 2 FREIGHT © Cover picture-Sara Bizzotto Report Fostering Rail Through Green Deal-part 2 Freight ERA1234 Making the railway system work better for society.”

- [15] “The European Rail Freight Market Competitive Analysis and Recommendations Study on behalf of European Rail Freight Association (ERFA) Final Report-April 2022.”
- [16] E. Union, “A compelling vision for the target railway system”, doi: 10.2821/59548.
- [17] “Documento Strategico della mobilità ferroviaria di passeggeri e merci.”
- [18] “European Rail Industry A driver for EU competitiveness and sustainable mobility worldwide Prepared by UNIFE, the European Rail Industry Association POCKET GUIDE FACTS ON THE RAIL SUPPLY INDUSTRY.”
- [19] E. Union Agency For Railways, “Report. Rail Environmental Report”, doi: 10.2821/243881.
- [20] “Futuro di Ferrovia 2050,” 2019. [Online]. Available: www.onlinedoctranslator.com

Sitografia

SCMT:

“Sistema di Controllo Marcia Treno (SCMT)” – RFI: <https://www.rfi.it/it/Sicurezza-e-tecnologie/tecnologie/ccs/Controllo-Marcia-Treno/Sistema-Controllo-Marcia-Treno--SCMT.html>

“Il sistema controllo marcia treno (SCMT)” - Segnali ferroviari italiani (2019):
https://www.segnalifs.it/sfi/it/sa/N_scm.html

SSC:

“Il sistema supporto condotta (SCC)” – RFI: <https://www.rfi.it/it/Sicurezza-e-tecnologie/tecnologie/ccs/Controllo-Marcia-Treno/il-sistema-supporto-condotta--ssc.html>

“Sistema di supporto alla condotta” Segnali ferroviari italiani (2010):
https://www.segnalifs.it/sfi/it/sa/N_ssc.html

ERTMS/ETCS:

“ETCS levels and modes” – European Commission: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/rail/ertms/what-ertms-and-how-does-it-work/etcs-levels-and-modes_en

ATO:

“Automatic train control” – CIFI wikirail: <https://wikirail.it/glossario/automatic-train-control/>

CBTC:

<https://www.hitachirail.com/it/prodotti-e-soluzioni/segnalamento-sistemi/segnalamento-e-gestione-del-traffico/>

“Mercato del sistema di controllo dei treni basato sulla comunicazione per tipo di treno (metropolitane, treni pendolari, treni ad alta velocità), per tipo (CBTC di base, I-CBTC), per grado di automazione (GoA1, GoA2, GoA3, GoA4) e regione, tendenze globali e previsioni dal 2023 al 2030” – Exactitude consultancy (2023):

<https://exactitudeconsultancy.com/it/reports/32225/communication-based-train-control-system-market/>

ERSAT:

“Tecnologie innovative nei nodi urbani, più traffico ferroviario e treni ogni tre minuti” – Ferrovie dello Stato Italiane (2016):

<https://www.fsitaliane.it/content/fsitaliane/it/media/comunicati-stampa/2016/5/31/Tecnologie-innovative-nei-nodi-urbani-piu-traffico-ferroviario-e-treni-ogni-tre-minuti.html>

INDICATORI DI PERFORMANCE:

“Railway Signaling System industry Companies” – Market Research future (2023):

<https://www.marketresearchfuture.com/reports/railway-signaling-system-market/companies>

ANALISI PESTEL:

“COMMISSIONE EUROPEA: DELEGHE PER IL COMMISSARIO AI TRASPORTI
APOSTOLOS TZITZICOSTAS (17 settembre 2024)” – CONFETRA (2024):

https://www.confetra.com/news_ue/

“Un sistema ferroviario dell’Unione europea interoperabile” – EUR LEX European Union
(2023): <https://eur-lex.europa.eu/IT/legal-content/summary/an-interoperable-eu-rail-system.html>

Indice delle figure

Figura 1- Componenti fondamentali e interazioni della tecnologia SCMT	7
Figura 2 - Componenti fondamentali e interazioni della tecnologia SSC.....	9
Figura 3- ERTMS L1, illustrazione dei componenti e delle loro relazioni che costituiscono la tecnologia	10
Figura 4- ERTMS L2, illustrazione dei componenti e delle loro relazioni che costituiscono la tecnologia	11
Figura 5- ERTMS L3, illustrazione dei componenti e delle loro relazioni che costituiscono la tecnologia	12
Figura 6- Evoluzione della tecnologia ETCS con sviluppo della infrastruttura di rete da GSM-R a FRMCS	12
Figura 7- Brevetto Hitachi 27.07.2022 Bollettino 2022/30	15
Figure 8- Tecnologia ERSAT, illustrazione dei componenti e delle loro relazioni che costituiscono la tecnologia	18
Figura 9- confronto tra tecnologie ERSAT e ERTMS.....	18
Figura 10- Modello lineare dell'innovazione per le tecnologie del segnalamento ferroviario.	20
Figura 11- Mappa globale relativa alle Startup che fino al 2022 hanno sviluppato tecnologie innovative relative all'Autonomous Train System (ATS) per sostenere le imprese leader nel settore	21
Figura 12- Matrice del modello di Henderson e Clark.....	22
Figura 13- Andamento delle curve a S relative all'indicatore di performance [km/M€] per le tecnologie SCMT ed SSC in funzione del tempo [Anno].....	31
Figura 14- Andamento delle curve a S relative all'indicatore di performance [km/M€] per le tecnologie ETCS L1 ed ETCS L2 in funzione del tempo [Anno].....	32
Figura 15- Andamento delle curve ad S relative all'indicatore di performance [km/ M€] per le tecnologie ETCS L3, ERSAT, ATO- GoA4, CBTC in funzione del tempo [Anno].....	33
Figura 16- Grafico di confronto sull'andamento delle curve ad S relative all'indicatore di performance [km/ M€] per le tecnologie SCMT, SSC, ETCS L1, ETCS L2 in funzione del tempo [Anno]	34

Figura 17- Grafico di confronto sull'andamento delle curve ad S relative all'indicatore di performance [km/ M€] per le tecnologie innovative sul mercato in funzione del tempo [Anno]	35
Figura 18- Andamento dell'indicatore di performance "Capacità" nel tempo per le tecnologie SCMT, SSC, ETCS L1 e ETCS L2.....	37
Figura 19- Grafico di confronto dell'andamento dell'indicatore di performance "Capacità" nel tempo per le tecnologie del segnalamento ferroviario	38
Figura 20- Andamento dell'indicatore di performance "capacità" della tecnologia ETCS L2	40
Figura 21- Andamento delle vendite della tecnologia ETCS L2	41
Figura 22- Andamento del numero di imprese incumbent ed entranti nella tecnologia ETCS L2	42
Figura 23- Andamento del numero di brevetti pubblicati per la tecnologia ETCS L2	42
Figura 24- Confronto tra le performance relative alla capacità della linea con l'uso delle tecnologie SCMT ed ETCS L1 e L2	43
Figura 25- Confronto tra le vendite delle tecnologie SCMT ed ETCS L1 e L2	44
Figura 26- Confronto tra il numero di imprese che si occupano di tecnologie SCMT ed ETCS L1 e L2	44
Figura 27- Confronto tra il numero di brevetti pubblicati per le tecnologie SCMT ed ETCS L1 e L2.....	47
Figura 28- Curva di Rogers o curva di Moore (fonte: Libro - "Management of innovation and product development").....	48
Figure 29- Distribuzione percentuale delle vendite relative alla tecnologia ETCS L1/L2 in termini di chilometri realizzati linea (diagramma a torta a sinistra) e di numero di veicoli venduti (diagramma a torta a destra) nel mondo.....	49
Figura 30- Istogramma che rappresenta la relazione tra i chilometri di linea espressi in migliaia (k) e i Paesi Europei in cui si estendono	50
Figure 31- Paesi in cui è presente la tecnologia ETCS L2 secondo la classificazione di Rogers	51
Figura 32- Istogramma che rappresenta la relazione tra i chilometri di linea espressi in migliaia (k) di chilometri, e i Paesi a livello globale in cui si estendono.....	52
Figura 33- Andamento volumi di trasporto merci sulle linee ferroviarie rispetto alla richiesta della Commissione Europea.....	58

Figura 34- Corridoi ferroviari europei.....	59
Figura 35- Investimenti dell'Unione Europea nelle tecnologie innovative del settore ferroviario	63
Figura 36- Confronto tra mezzi di trasporto prima e dopo l'introduzione di innovazioni.....	67
Figura 37- Confronto dei mezzi di trasporto rispetto alla capacità	72
Figura 38- Emissioni per treni merci e per treni per il trasporto di persone dagli ultimi anni '90 al primo decennio del 2000	73
Figura 39- Componenti ferroviarie che influenzano le emissioni di gas serra.....	73

Indice delle tabelle

Tabella 1- Diagrammi a blocchi e matrice di Henderson e Clark per le tecnologie SCMT, SSC, CBTC	24
Tabella 2- Diagrammi a blocchi e matrice di Henderson e Clark per le tecnologie ETCS L1, L2 e L3.....	25
Tabella 3– Diagrammi a blocchi e matrice di Henderson e Clark per le tecnologie ATO ed ERSAT	27
Tabella 4- Estensione in [km] delle linee con tecnologie SCMT ed SSC negli anni.....	30
Tabella 5- Dati numerici per la formula individuata dell'indicatore della capacità della linea ferroviaria valutati per tecnologia e con evoluzioni annuali	36
Tabella 6- Confronto costi di manutenzione ERTMS L2- SCMT	65