

Prof. Ing. Guido Caposio

**LA TECNOLOGIA DEL TRASPORTO GUIDATO
A LEVITAZIONE MAGNETICA**

SOMMARIO

1. SISTEMI A LEVITAZIONE MAGNETICA	pag. 3
2. IL SISTEMA MAGLEV	pag. 4
2.1 SISTEMA A SOSPENSIONE ELETTROMAGNETICA (EMS)	pag. 4
2.2 SISTEMA A SOSPENSIONE ELETTRODINAMICA (EDS)	pag. 5
2.3 SISTEMA A SOSPENSIONE CON MAGNETI PERMANENTI (INDUCTRACK)	pag. 6
3. SISTEMA HYPERLOOP	pag. 9
4. SISTEMA IRONLEV	pag. 12
5. CONFRONTO TRA LINEE AD AV TRADIZIONALI E SISTEMI A LEVITAZIONE MAGNETICA QUALE PREMESSA A STUDI DI FATTIBILITÀ	pag. 14
6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	pag. 20

LA TECNOLOGIA DEL TRASPORTO GUIDATO A LEVITAZIONE MAGNETICA

1. SISTEMI A LEVITAZIONE MAGNETICA

La levitazione magnetica, nell'ambito del trasporto guidato, opera con l'azione di forze elettromagnetiche per la mobilità del vettore basata sul principio di base del magnetismo per cui due poli magnetici uguali si respingono, mentre due poli opposti si attraggono.

Ad esempio in un sistema di trasporto ferroviario su rotaia lungo le carrozze che compongono il convoglio si possono posizionare elettromagneti (o bobine superconduttrici) con lo scopo di generare un campo magnetico da corrente elettrica e lungo i binari disporre bobine alimentate da una corrente trifase.

Pertanto, il treno verrebbe costantemente attratto e spinto indietro nella direzione del suo moto, mentre la propulsione potrebbe essere fornita da un motore lineare sincrono.

Il motore lineare sincrono nei treni può essere costituito da un rotore (posto sul binario) e da uno statore (posto sotto il carro), entrambi separati tra loro.

La ricerca di tecnologie avanzate con l'uso principalmente della levitazione magnetica e non solo, nell'ambito del trasporto guidato, per la realizzazione di sistemi che fossero in grado di fornire alte prestazioni di velocità, ha permesso di ottenere risultati allineati a quelli aeronautici ma a più contenuto impatto ambientale.

Inoltre i sistemi a levitazione magnetica garantiscono un consumo energetico, a parità di lunghezza di viaggio e medesima velocità operativa, molto inferiore rispetto ai sistemi ferroviari su ruota.

Le tecnologie moderne del settore, già sperimentate, si possono inquadrare in tre sistemi:

- **Sistema MAGLEV** (*Magnetic Levitation* – levitazione magnetica) che utilizza magneti superconduttori per far librare il convoglio sopra un binario elettrico, viaggiando a oltre 600 km/h.
Raggiungere e mantenere l'equilibrio del convoglio sulla via di corsa è un'azione complessa entrando in gioco forze gravitazionali, elettriche e magnetiche.
- **Sistema HYPERLOOP** (Brevetto della *Hyperloop Transportation Technologies*) che utilizza tubi a bassa pressione per poter spingere capsule, che possono contenere passeggeri o merci, fino a velocità di 1.200 - 1.220 km/h.
Le capsule si muovono su un cuscino d'aria generato attraverso più aperture nella sua base, così da ridurre ulteriormente l'attrito.
In alternativa si possono utilizzare magneti permanenti per la levitazione magnetica delle capsule.
- **Sistema IRONLEV** che utilizza un carrello a levitazione magnetica, studiato per funzionare sulle vie di corsa ferroviarie già esistenti sino a velocità di 500 km/h.
Il sistema si potrà applicare su treni di nuova generazione, sostituendo le ruote con pattini a levitazione magnetica appositamente studiati.

2. IL SISTEMA MAGLEV

La levitazione magnetica è una tecnologia di trasporto mediante la quale i convogli si muovono guidati e spinti da campi magnetici mentre sono sospesi sopra una via di corsa (*guideway* realizzata con materiali tradizionali acciaio, calcestruzzo e alluminio), senza essere fisicamente a contatto con alcuna superficie di scorrimento.

Il Maglev utilizza un motore lineare e i cui avvolgimenti elettrici sono posizionati sul *guideway*, in modo da produrre un campo elettromagnetico.

Il convoglio, essendo sospeso in aria, non ha contatto con la via di corsa e quindi l'unica forza che si oppone al moto è quella dovuta alla resistenza all'aria.

Di conseguenza il Maglev è in grado di viaggiare a velocità elevatissime con un consumo di energia contenuto e un livello di rumore accettabile.

Alcune tipologie di convogli realizzati sono in grado di viaggiare ad oltre 600 km/h, velocità comparabile con quella del trasporto aereo.

Il principio di funzionamento del Maglev si può così riassumere:

- utilizzando due magneti accostati con i poli opposti su di una superficie liscia, attraverso il blocco di uno dei magneti avviene lo scivolamento del secondo sulla superficie liscia.

La tecnologia di sospensione è stata studiata con l'applicazione di tre tipologie alternative:

- la prima è la **sospensione elettromagnetica**, in cui sono utilizzati elettromagneti convenzionali che sorreggono il treno sopra la via di corsa;
- la seconda, invece, è la **sospensione elettrodinamica**, che sfrutta le polarità opposte dei magneti del veicolo e delle rotaie, mettendo in movimento il veicolo con la forza repulsiva fra di essi;
- la terza si basa sull'effetto di repulsione di **elementi magnetici permanenti** posti sul veicolo. Il sistema utilizza elettromagneti non alimentati (passivi) e magneti permanenti.

Le prime due tipologie di tecnologia sopracitate, per consentire il movimento del convoglio mantenendolo sospeso sopra la via di corsa, utilizzano un'onda magnetica che si propaga lungo la *guideway*.

2.1 SISTEMA A SOSPENSIONE ELETTROMAGNETICA (EMS)

La sospensione elettromagnetica è un sistema di levitazione che utilizza una forza magnetica attrattiva per mezzo della quale elettromagneti convenzionali collocati all'interno delle due estremità curve site sotto e sui fianchi interni del convoglio, interagiscono e sono attratti da sbarre ferromagnetiche poste sulla *guideway* stessa (Fig.1).

Questo sistema, intrinsecamente instabile, è reso operativo da sistemi di controllo elettronici che mantengono costante l'*apertura d'aria* tra il veicolo e la *guideway*. Tale distanza, approssimativamente di 15 mm, deve essere costantemente misurata e corretta per impedire al veicolo di urtare contro la *guideway* stessa.

Le variazioni dei carichi trasportati in termini di peso, carichi dinamici e irregolarità della *guideway* sono compensate dal cambiamento dell'intensità del campo magnetico in risposta alle diverse misurazioni dell'*apertura d'aria* ossia la distanza tra convoglio e *guideway*.

Nel sistema EMS, i magneti avvolgono le sbarre d'acciaio della pista e sono controllati attivamente da sensori elettronici che misurano l'*apertura d'aria*.



Fig. 1

2.2 SISTEMA A SOSPENSIONE ELETTRODINAMICA (EDS)

Questo sistema, per ottenere la levitazione, utilizza le forze opposte tra i magneti installati sotto il convoglio e le strisce o gli avvolgimenti elettricamente conduttivi, siti sulla *guideway*.

Il sistema è intrinsecamente stabile e non richiede monitoraggi e correzioni.

Inoltre, tra la *guideway* e il convoglio vi è un'*apertura d'aria* relativamente ampia, in genere compresa tra 100 e 150 mm.

I convogli EDS (Fig. 2) utilizzano magneti superconduttori, estremamente potenti e leggeri ma più costosi dei magneti convenzionali e richiedono un sistema di refrigerazione installato sul convoglio che li mantenga a bassa temperatura.

La levitazione in un sistema EDS è il risultato del movimento relativo fra i magneti e le bobine. Questo tipo di levitazione è intrinsecamente stabile sopra di una certa soglia di velocità. Le correnti indotte esercitano una forza per muovere i magneti in modo che possano interagire con le bobine generando un flusso magnetico.



Fig. 2

2.3 SISTEMA A SOSPENSIONE CON MAGNETI PERMANENTI (INDUCTRACK)

Questa tecnologia, la più economica e promettente, si basa sull'effetto di repulsione di elementi magnetici permanenti posti sul veicolo. Il sistema utilizza elettromagneti non alimentati (passivi) e magneti permanenti (Fig. 3).

Nella condizione di fermo, il convoglio poggia su ruote di gomma. Per iniziare a muoversi, il convoglio avanza lentamente sulle ruote, consentendo ai magneti sotto il treno di interagire con quelli dei binari.

Una volta che il convoglio raggiunga i 150 km/h, la forza magnetica è sufficiente da permetterne un sollevamento di 100 mm da terra, eliminando l'attrito e per consentire di operare a velocità sempre più elevate.

L'unico requisito richiesto, per mantenere la levitazione, è il movimento del convoglio a bassa velocità (pochi Km/h, all'incirca a passo d'uomo).

I circuiti conduttori sul tracciato traggono energia dal movimento del treno (questo viene denominato *trascinamento magnetico*), assicurando una buona efficienza.

I magneti e il carrello sono alimentati solo nella fase di accelerazione del carrello.

Il sistema Inductrack:

- venne sviluppato originariamente dal fisico Richard Post del Lawrence Livermore National Laboratory per creare un motore magnetico che immagazzinasse energia attraverso il movimento del carrello;



Fig. 3

- utilizza per stabilizzarsi degli *Halbach array* (magnete permanente Halbach), costituiti dall'unione di magneti permanenti disposti in modo da rafforzare il campo magnetico lungo una faccia dell'*array* e contemporaneamente per cancellare con interferenza, il campo magnetico nella faccia opposta. Gli *Halbach array* quindi, stabilizzano il movimento del treno con le linee di forza magnetiche senza necessità di elettronica.

Si precisa che *Halbach array* è, come detto, una struttura magnetica.

Utilizza una disposizione speciale di unità magnetiche per migliorare l'intensità del campo.

L'obiettivo è utilizzare la minor quantità di magneti per generare un campo magnetico potente.

Il funzionamento dell'unità *Halbach array* è schematizzato in Fig. 4.

A sinistra della figura è rappresentato un singolo magnete con tutti i poli nord rivolti verso l'alto.

Attraverso la distribuzione del colore, nella figura è possibile notare che l'intensità del campo magnetico è distribuita sia nella parte inferiore che in quella superiore del magnete.

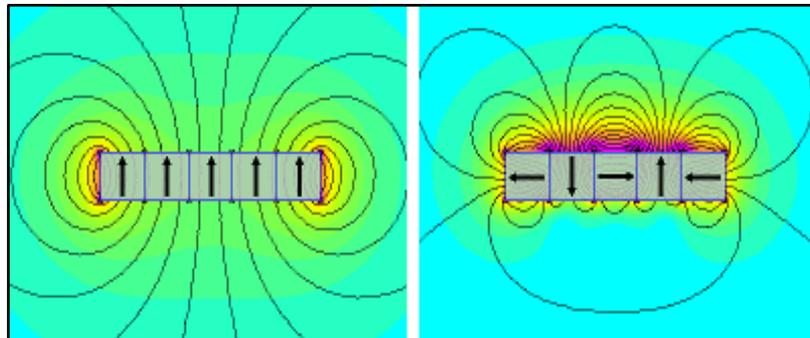


Fig. 4

Sulla destra della Fig.4 è rappresentato un *Halbach array*. Il campo magnetico nella parte superiore del magnete è relativamente alto, mentre nella parte inferiore è debole.

Per le sue eccellenti caratteristiche di distribuzione del campo magnetico, gli *Halbach array* sono utilizzati nella levitazione magnetica.

Gli *array lineari Halbach* sono attualmente utilizzati principalmente nei motori lineari.

Il principio di levitazione del treno maglev è legato al magnete mobile che interagisce con il campo magnetico generato dalla corrente indotta nel conduttore per generare forza di levitazione e, contemporaneamente, operare la repulsione magnetica.

Migliorare la galleggiabilità e il rapporto di repulsione è la chiave per ottimizzare le prestazioni del sistema di levitazione, che richiede:

- il peso del magnete di bordo leggero,
- elevato campo magnetico,
- campo magnetico uniforme,
- alta affidabilità.

L'*Halbach array* è installato orizzontalmente al centro del corpo vettura e frontalmente interagisce con l'avvolgimento al centro della pista per generare forza propulsiva. Tale geometria frontale massimizza il campo magnetico con una piccola quantità di magneti, mentre il lato posteriore dell'*Halbach array* è avvolto da minori campi magnetici.

Le forze magnetiche di sollevamento del convoglio attivano lo spostamento contestuale in avanti mantenendolo al centro dei binari.

Si tratta della stessa tecnologia utilizzata da Tesla's Hyperloop, che rende la guida fluida e il convoglio ad alto grado di sicurezza nell'esercizio.

Il sistema Inductrack per i treni maglev evita le problematiche che coinvolgono entrambi i sistemi EMS ed EDS, specialmente per le sospensioni di sicurezza.

Utilizza solo magneti permanenti in un *Halbach array* montati sul vagone del treno e circuiti conduttivi non alimentati installati sul tracciato per provvedere alla levitazione.

Come detto l'unico requisito è che il treno, per mantenere la levitazione, debba essere già in movimento a pochi chilometri orari (all'incirca a passo d'uomo).

Ad una certa velocità critica il campo magnetico indotto è abbastanza forte da indurre la levitazione sopra una serie di circuiti del campo. Gli *Halbach array* si possono distribuire in una configurazione stabile ed essere installati, ad esempio, in un vagone ferroviario.

3. SISTEMA HYPERLOOP

Hyperloop è un sistema di trasporto passeggeri che utilizza capsule sospese elettromagneticamente, in tubi costituenti la via di corsa, in condizione di vuoto.

Il sistema Hyperloop (Fig. 5) è costituito da sei parti principali.

- **La linea di tubi** costituita, nella struttura di base, da due linee di tubi paralleli con stazioni lungo il tracciato. Tale conformazione consente l'esercizio dei veicoli in entrambe le direzioni senza interferenza tra loro, sia nell'imbarco che nello sbarco dei passeggeri.

La coppia di tubi è retta da pile su pali di fondazione. In testa pile sono collocati assorbitori dinamici per attenuare oscillazioni dovuti a terremoti o ad assestamento del terreno. Sopra i tubi sono collocati opportuni pannelli solari che forniranno energia al sistema.

Una serie di simulazioni strutturali è stata sviluppata per garantire che tutto il sistema Hyperloop rispondesse positivamente a sollecitazioni esterne, al peso della infrastruttura e agli effetti del vento che potrebbero portare ad una instabilità alla struttura.

Nei tubi viene mantenuto un vuoto approssimativamente al livello di 8-10 Torr (la pressione atmosferica standardizzata è pari a 760 Torr= 1,31 Atm).

Sono previste due possibilità di progetto funzionale per la linea.

La prima con esercizio per soli passeggeri, la seconda mista sia per passeggeri che per merci. La seconda opzione prevede sezioni maggiori sia per il tubo che per le capsule. Il diametro del tubo per trasporto di soli passeggeri è di 2,23 m, per la variante mista passeggeri e merci è di 3,3 m. Le capsule per soli passeggeri sono della capacità standardizzata di posti a sedere di 28 posti per unità, la variante mista passeggeri e merci offre spazio per 14 passeggeri e 3 autovetture per unità.

- **Il convoglio:** la sua composizione potrebbe essere costituita da una sola o da più capsule accoppiate. Ogni singola capsula o più capsule accoppiate, da 28 passeggeri per capsula, saranno spinte da un acceleratore lineare magnetico posizionato presso le stazioni, con

Nel 2013 venne fondata **HyperloopTT**, con un team di oltre 800 ingegneri attivi su 52 temi multidisciplinari e 50 partner aziendali e universitari. Le sedi della società sono dislocate a Los Angeles e a Tolosa. Peraltro HyperloopTT ha uffici in Nord e Sud America, Medio Oriente ed Europa.



Fig. 6

Le capsule dell'Hyperloop in alluminio strutturale e in fibra di carbonio leggera (materiale denominato Vibranium) sono realizzate a doppio strato (Fig. 6).

Il primo ne costituisce il rivestimento esterno, mentre il secondo nasce per proteggere lo scompartimento dei passeggeri e per garantire maggior sicurezza rispetto alle carrozze del treno tradizionale.

Nel sistema a doppio strato sono collocati sensori che analizzano continuamente, in modalità wireless, la struttura interna della capsula controllandone stabilità, temperatura e l'integrità strutturale.

La garanzia della sicurezza dei passeggeri è stata studiata anche nella eventualità di incidente esterno alla capsula.

I sensori sono progettati per fornire un continuo feedback al sistema di controllo, in modo tale che se una capsula fosse danneggiata durante l'esercizio possa essere ritirata non appena giunta a destinazione.

La capsula **XP-1**, di lunghezza pari a 8,7 m, larghezza 2,4 m e altezza 2,7 m, è stata sottoposta al test di prova, con due passeggeri su una tratta di 500 m, nel 2020 in Nevada.

Su tale tratta ha raggiunto una velocità di 172 km/h in 6,52".

Tale test ha dimostrato che la tecnologia Hyperloop One funziona e che il sistema Hyperloop avrebbe potuto essere realizzato per l'esercizio di una linea.

La prima tratta di linea di Hyperloop, in fase di realizzazione, è stata studiata per un servizio di collegamento di 160 km che collegherà Abu Dhabi a Dubai.

Tale tratta potrà essere percorsa in dodici minuti viaggiando ad una velocità media di 800 Km/h. L'Hyperloop è l'unico treno al mondo che, con il motore elettrico, riuscirà a raggiungere la propulsione e la levitazione ad alta velocità in un ambiente controllato a bassa pressione.

4. SISTEMA IRONLEV

Il sistema Ironlev utilizza potenti magneti applicati a un pattino (il sostituto delle ruote sotto il vagone), che interagiscono con i binari, generando così movimento senza contatto sulla via di corsa (Fig. 7).

Il progetto IronLev prevede di utilizzare la rete ferroviaria già esistente sul suolo italiano e di ottenere la levitazione magnetica, adeguando i pattini che andranno montati sotto i vagoni dei treni, in modo da non dover ricostruire una nuova rete ferroviaria.

I magneti montati sul pattino sviluppano una forza attrattiva sulla rotaia e sfruttano i campi generati autonomamente dall'interazione per ottenere movimento, fluido e silenzioso.

La **Giroto Brevetti di Treviso** ha stretto una partnership con la startup pisana **Ales Tech** che, a seguito della sua attività passata all'interno di Hyperloop, si occupa dello sviluppo di Ironlev.

Il nuovo sistema Ironlev è stato testato, con successo, a Spresiano, in provincia di Treviso.

Per raggiungere un peso complessivo di 5 t, su un carrello a levitazione magnetica, è stata caricata e trasportata un'automobile Tesla.

Dunque, la nuova tecnologia italiana non prevede nessun tubo nel quale lanciare capsule ad altissima velocità, ma promette picchi di velocità di almeno 500 km/h.

L'unica incertezza però, è come integrare i deviatori di binario. Al momento sono al vaglio diverse soluzioni, ma è prevista una soluzione del problema nel breve che potrebbe rendere applicabile il sistema anche su scala urbana sia per linee di metropolitana che di tram.

I vantaggi non si limitano all'ambiente, ma coinvolgono il lato economico e prestazionale dell'esercizio ferroviario, permettendo di estendere il trasporto ad alta velocità su tutti i territori d'Italia.



Fig. 7

Grazie alle caratteristiche della tecnologia:

- **non** occorre alimentare elettricamente la rete o i magneti,
- **non** vengono impiegati carburanti,
- **non** si crea attrito sui binari.

Con la levitazione magnetica passiva è possibile spostare un vagone di 10 t con la stessa forza necessaria a sollevare un peso di 10 Kg.

L'unica energia da impiegare è quella per mettere in movimento il vagone.

La spinta e la frenata con recupero possono essere impresse al convoglio con diverse modalità, a seconda del tipo di applicazione e della velocità che si vuole raggiungere.

I motori di spinta e frenata possono essere applicati sia sui convogli che sulle rotaie. In convogli a bassa velocità si potrà ottenere spinta e frenata tramite ruote di contatto laterali motorizzate, che non aumentano l'attrito del carico.

5. CONFRONTO TRA LINEE AD AV TRADIZIONALI E SISTEMI A LEVITAZIONE MAGNETICA QUALE PREMESSA A STUDI DI FATTIBILITÀ

Il MIMS (Ministero delle Infrastrutture e della mobilità sostenibile) nel Luglio 2021 ha pubblicato **Linee guida per la redazione del progetto di fattibilità tecnica ed economica da porre a base dell'affidamento di contratti pubblici di lavori del PNRR e del PNC.**

La finalità sostanziale del progetto di fattibilità tecnica ed economica (PFTE), per assegnati obiettivi, è la progettazione della soluzione che, **tra le alternative possibili**, presenta il miglior rapporto tra **costi complessivi da sostenere e benefici attesi per la collettività.**

Gli articoli 44 e 48 del DL 31-5-2021, n. 77, convertito nella Legge 29-7- 2021 n. 108, stabiliscono, una procedura accelerata per la realizzazione di *grandi opere*.

Sulla base del PFTE **le stazioni appaltanti hanno la facoltà di affidare congiuntamente la progettazione ed esecuzione dei relativi lavori anche sulla base del medesimo PFTE.**

Tale facoltà comunque deve avere la connessione con le procedure di affidamento delle risorse dal Piano nazionale di ripresa e resilienza (PNRR) e dal Piano nazionale per gli investimenti complementari (PNC).

Il PNRR riconosce agli investimenti nelle infrastrutture ed in particolare sulle linee ad AV un ruolo centrale per lo sviluppo e la coesione.

Nel contempo, coerentemente con le linee guida e le strategie adottate a livello europeo, il Piano promuove una visione integrata dello sviluppo.

Due sono le macro-fasi che consentono di pervenire alla compiuta redazione del progetto di fattibilità tecnica ed economica con quelle indispensabili caratteristiche di completezza degli elaborati riguardo al rapporto tra assetto geometrico-spaziale dell'infrastruttura, componenti ambientali e matrice territoriale.

Dette macro-fasi, coerenti con il vigente quadro normativo di settore ma certamente innovative riguardo alla cornice metodologica di riferimento, assolvono a due distinti obiettivi:

- **FASE 1:** definizione del **che cosa** debba essere progettato in una cornice più generale di promozione dello sviluppo sostenibile;
In questa rinnovata cornice metodologica e concettuale, nella prima fase viene evidenziato il quadro esigenziale relativo ai fabbisogni del contesto economico e sociale e ai correlati obiettivi e indicatori di prestazione. Esso funge anche da documento di indirizzo per l'attività successiva.
- **FASE 2:** definizione del **come** pervenire ad una efficiente progettazione dell'opera, così come individuata nella prima macro-fase, tenendo conto degli elementi qualificativi di sostenibilità dell'opera stessa lungo l'intero ciclo di vita.
Individuata l'alternativa progettuale complessivamente *preferibile*, nella seconda fase il documento di indirizzo alla progettazione (DIP) disciplina la redazione del progetto di fattibilità tecnica ed economica (PFTE). Nel DIP si rinvergono i requisiti prestazionali che dovranno essere perseguiti dalle strategie progettuali.

Nel PFTE può essere condotto, sulla prescelta alternativa progettuale, un confronto comparato tra differenti tipologie funzionali.

L'analisi multicriteri può essere utilizzata come strumento metodologico per detto confronto.

Sulla base del quadro esigenziale, il documento di fattibilità delle alternative progettuali (DOCFAP) sviluppa un confronto comparato tra alternative progettuali che perseguono i traguardati obiettivi.

L'analisi costi benefici (ACB) è il principale strumento metodologico a supporto della scelta tra alternative progettuali.

La ricerca scientifica e tecnologica continua a produrre trasporti sempre più veloci.

Come risultato di questi studi, dopo le convenzionali ferrovie ad AV gestite in molti paesi di tutto il mondo che offrono a milioni di passeggeri l'opportunità di viaggio veloce e confortevole, sono nate tecnologie avanzate con l'uso della levitazione magnetica.

Quindi si è affermata la tecnologia pionieristica Maglev in Giappone e in Germania, e infine avanzano nel mondo progetti con la nuova modalità di trasporto Hyperloop.

Anche se la tecnologia Hyperloop è un modo di trasporto altamente innovativo, gli studi sullo sviluppo di tale tecnologia si stanno diffondendo.

A titolo informativo la Regione Veneto ha comunicato pochi giorni fa, la volontà di sperimentare in Veneto Hyperloop. È stato firmato a Verona l'accordo fra la Regione, il Ministero delle Infrastrutture e mobilità sostenibile e CAV (Concessioni Autostradali Venete).

La prima tratta in progetto è prevista fra Padova e Venezia con tempo di percorrenza di sei minuti.

Il basso costo di costruzione previsto, velocità e minimi impatti ambientali mettono in evidenza tale tecnologia tra i tipi di trasporto precedentemente illustrati.

In relazione allo stato dell'arte di conoscenza ancora sperimentale dei sistemi Maglev ed Hyperloop, ai fini di indirizzo di scelta dell'impiego di un sistema, in un determinato progetto di collegamento, si potrebbe effettuare uno studio di FASE 1 per un'analisi comparativa generale tra i vari sistemi di trasporto guidato ad AV e quello a levitazione magnetica autonoma tipo IronLev.

Anche se in via sperimentale tale sistema, come detto, prevede di utilizzare la rete ferroviaria già esistente con uso di levitazione magnetica, adeguando i pattini che andranno montati sotto i vagoni dei treni, in modo da non dover ricostruire una nuova rete ferroviaria.

Sul punto FS, per studiare le potenzialità di questo sistema di trasporto, ha firmato, a giugno del 2021, un **Memorandum of Understanding** con la società tecnologica polacco-svizzera **Nevomo** (Fig. 8).



Fig. 8

L'accordo ha proprio l'obiettivo di verificare la fattibilità tecnica ed economica della nuova tecnologia, oltre che la reale possibilità di far coesistere il sistema ferroviario tradizionale e quello magnetico.

Magrail, la denominazione del nuovo sistema, infatti, si pone come un nuovo sistema di trasporto a levitazione magnetica integrato alle linee ferroviarie regionali e alta velocità esistenti, evitando così onerosi interventi sulle opere civili e i relativi investimenti.

Dal punto di vista tecnico, il sistema *magrail* punta a consentire il passaggio sulla stessa linea sia dei treni convenzionali sia dei nuovi veicoli a levitazione magnetica.

Questi ultimi, sfruttando la nuova tecnologia, potranno beneficiare di un aumento della velocità che, secondo le ipotesi allo studio, potrebbero arrivare fino al 75% in più rispetto a quella attuale.

A fini di studi comparativi allargati a sistemi ad AV sulla rivista **International advanced researches and engineering journal** è stato pubblicato (Aprile 2021) l'articolo **Comparison of conventional high speed railway, maglev and hyperloop transportation systems**.

In tale articolo gli autori (**Mehmet Nedim Yavuz e Zübeyde Öztürk - Università Turche di Istanbul**) riportano tra altro lo stato dell'arte di reti ad alta velocità comparandole con quelle a levitazione magnetica eseguite attraverso parametri tecnici dei sistemi in esercizio e in progetto.

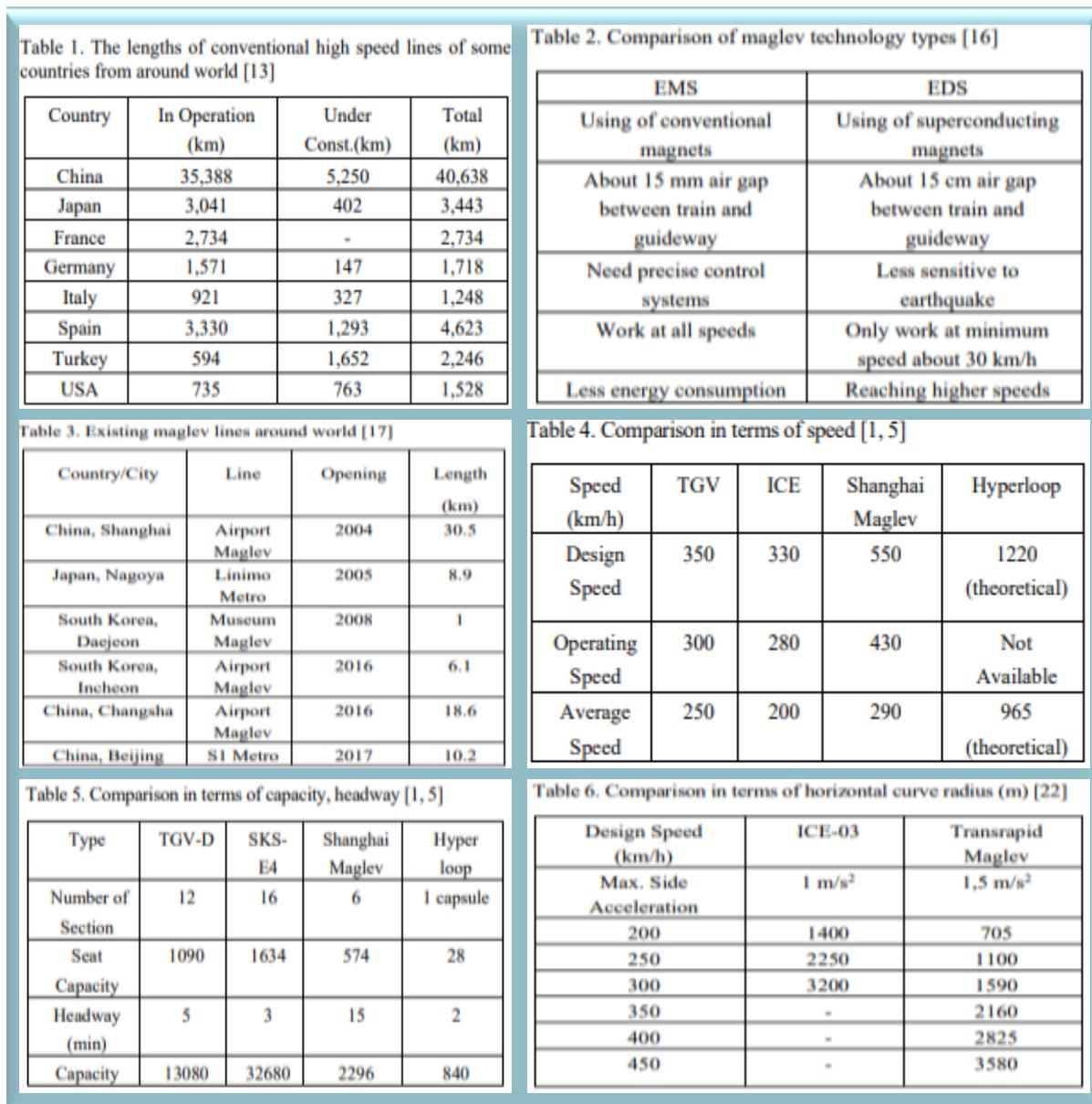


Fig. 8

Nelle Fig. 8-9 sono state riportate le tabelle, inserite nell'articolo citato, di confronto dei vari elementi funzionali e prestazionali dei sistemi di trasporto ad AV, MAGLEV, HYPERLOOP.

I contenuti di ciascuna delle undici tabelle sono così riassumibili:

Tab.1 Lunghezze (in km) complessive delle linee convenzionali ad AV in dotazione negli stati del mondo. La tabella riporta le lunghezze delle linee in esercizio, quelle in costruzione ed il totale complessivo

La Cina detiene il primato mondiale totale sviluppo di reti ad AV per una lunghezza di 40.638 Km. Nell'ambito europeo (Francia+Germania+Italia+Spagna) lo sviluppo totale di reti ad AV è pari a 10.323 Km.

Tab. 2 Analisi comparativa di componenti tecnici tra sistemi di trasporto MAGLEV a sospensione elettromagnetica (EMS) e a sospensione elettrodinamica (EDS).

Tab.3 Stato dell'arte dello sviluppo delle linee MAGLEV esistenti nel mondo con date di avvio dell'esercizio.

La prima, di 30,4 Km è attiva dal 2004 in Cina a Shangai; l'ultima realizzata in Cina, a Beijing, ed in esercizio dal 2007 è la linea di metropolitana S1 di 10,2 km.

Tab.4 Velocità progettuali, di esercizio, medie dei vari sistemi di trasporto ad AV, MAGLEV, HYPERLOOP. Mentre le velocità di AV, MAGLEV sono già state riscontrate, le velocità di HYPERLOOP sono teoriche non essendo ancora stata realizzata alcuna linea operativa.

Tab.5 Valutazione comparativa della massima capacità di trasporto oraria di convogli su una linea in una direzione in termini di trasporto passeggeri sui sistemi ad AV, MAGLEV, HYPERLOOP considerando anche le sezioni di blocco (distanziamento di sicurezza tra convogli).

Tab.6 Confronto delle lunghezze (in m) minime dei raggi di curvatura circolari orizzontali per differenti velocità di transito tra AV (ICE 03- Germania), MAGLEV.

Tab.7 Lunghezze minime (in m) dei raggi di curvatura orizzontali, circolari, per differenti velocità di transito, su tronchi in progetto di HYPERLOOP in USA.

Tab.8 Confronto delle lunghezze (in m) minime dei raggi di curvatura verticali concavi o convessi per differenti velocità di progetto tra AV (ICE 03- Germania), MAGLEV.

Tab.9 Confronto tra costi di costruzione (totali e al Km) di linee ad AV(HSR), MAGLEV, HYPERLOOP (Ipotetica linea in California a Los Angeles di 563 km).

Per un'analisi comparativa completa sarebbe stata necessaria anche la valutazione dei costi di manutenzione. Ad esempio il sistema MAGLEV ha un costo di manutenzione nettamente inferiore a quello delle linee ferroviari tradizionali ad AV.

Tab.10 Confronto dell'uso del suolo (m^2 per metro lineare di linea) delle linee ad AV (HSR), MAGLEV, HYPERLOOP nelle zone pianeggianti e collinari.

Tab.11 Sintesi dei parametri comparativi tra linee tradizionali ad AV(HSR), MAGLEV, HYPERLOOP.

Table 7. Minimum horizontal curve radius in Hyperloop [5]

Track Route	Design Speed (km/h)	Min. horizontal curve radius (m)
L.Angeles-Grapevine South	480	3670
L.Angeles-Grapevine North	890	12550
I-580/San Francisco Bay	1220	23500

Table 8. Comparison in terms of vertical curve radius (m) [22]

Design Speed (km/h)	ICE-03		Transrapid Maglev	
	Crest	Sag	Crest	Sag
Max. Vertical Acceleration	0,5 m/s ²	0,6 m/s ²	0,6 m/s ²	1,2 m/s ²
200	6400	5200	5150	2600
300	14400	11700	11600	5790
330	17400	14200	14000	7000
400	-	-	20600	10300
450	-	-	26000	13000

Table 9. Comparison in terms of construction cost [5,22]

Route	Transport Mode	Cost (billion \$)	Length (km)	Cost per km (million \$)
Tokyo-Osaka	HSR	0,92	570	1,6
Paris-Lyon	HSR	2,06	1000	2,06
Madrid-Barcelona	HSR	10,62	620	17,12
Beijing-Shanghai	HSR	35,80	1432	25
Shanghai	Maglev	1,58	30	52,67
Linimo	Maglev	0,92	8,8	104,77
L.Angeles-California	Hyper loop	6	563	10,66

Table 10. Comparison of land using [30]

Type	HSR	Maglev	Hyper loop
Average Land Consume (m ² /m)	26,2 (Plain)	23,2 (Plain)	Similar with Maglev
	43,5 (Hilly)	24,4 (Hilly)	

Table 11. Summarizing comparison parameters

System Features	Conventional HSR	Maglev	Hyperloop (HL)
Maximum Speed (km/h)	241 Acela (Boston to Newyork) 270 TGV (Paris to Lyon)	430 (Shanghai)	1220 (theoretical)
Capacity	1000 per train (California HSR)	574 per Shanghai Maglev train	28 per capsule
Use of existing infrastructure	New lines combined with existing lines	Need special track	Need special track
Construction Cost	Lower than Maglev and higher than HL (likely)	Higher than HSR	Lower than HSR (likely)
Operating and Maintenance Cost	Higher than Maglev and HL	Lower than HSR	Lower than HSR (likely)
Energy Consumption	Higher than Maglev and HL	Less than HSR	Solar panels Less than HSR (likely)
Safety	Proven technology	Proven technology	At concept stage
Noise and Vibration	Higher than Maglev and HL	Less than HSR	Less than HSR (likely)
Land Consume	Higher than Maglev and HL	Less than HSR	Less than HSR

Fig. 9

6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Le analisi sui quattro sistemi di trasporto ad AV, MAGLEV, HYPERLOOP, IRONLEV (MAGRAIL) precedentemente illustrate evidenziano che tali sistemi si differenziano per diversi fattori come:

- **velocità,**
- **capacità di trasporto,**
- **compatibilità con le linee ferroviarie ordinarie,**
- **standard geometrici,**
- **costi,**
- **consumi energetici,**
- **effetti ambientali.**

Velocità

Innanzitutto è da evidenziare l'esigenza del contenimento delle altissime velocità (oltre i 350 Km/h) sulle linee ferroviarie convenzionali ad AV a causa delle elevate sollecitazioni indotte sulla via di corsa e quindi per limitare i costi della manutenzione della linea.

Tale problematica non è ancora stata verificata per linee convenzionali adeguate per il nuovo sistema Ironlev (Magrail) che potrebbe raggiungere velocità di oltre 500 Km/h.

Se i valori di velocità di Hyperloop potranno essere raggiunti, la tecnologia Hyperloop avrebbe un grande vantaggio rispetto ai parametri di velocità dell'AV, di Ironlev (Magrail) nonché relativamente ai tempi di percorrenza.

Capacità di trasporto

Se si valutano i sistemi in termini di capacità, le ferrovie convenzionali ad AV e Ironlev (Magrail) garantiscono valori più significativi rispetto a Maglev ed Hyperloop.

Compatibilità con le linee ferroviarie ordinarie

In termini di compatibilità il sistema Maglev e il sistema di trasporto Hyperloop non sono compatibili e quindi integrabili con linee esistenti perché richiedono una propria linea speciale, una struttura di sostegno, stazioni, strutture di ricovero e officine di manutenzione.

Standard geometrici

In materia di standard geometrici, Maglev e Hyperloop richiedono raggi per le curve orizzontali inferiori, a parità di velocità, rispetto alla velocità di percorrenza ad AV delle ferrovie. Inoltre sono in grado di viaggiare a velocità più elevate, con lo stesso raggio di curvatura e in salita con pendenze più elevate.

Costi

Incompatibilità con le linee esistenti AV e alti costi di costruzione possono essere considerati come aspetti negativi del sistema di trasporto Maglev.

Prendendo in esame il costo medio di costruzione, il sistema di trasporto Hyperloop è più economico della ferrovia convenzionale ad AV.

Inoltre poiché il treno Maglev e la capsula Hyperloop si muovono senza contatto con la via di corsa, il costo di manutenzione è inferiore alle ferrovie convenzionali ad AV.

Non sono disponibili dati per il sistema di trasporto Ironlev (Magrail).

Consumi energetici

Nel confronto basato sul consumo energetico, i treni Maglev consumano il 20-30% in meno rispetto a treni convenzionali ad AV grazie all'aerodinamica.

Nel Rapporto Hyperloop Alpha, si afferma che la capsula Hyperloop funzionerebbe interamente con energia solare.

Di conseguenza, in Hyperloop il modo di trasporto dovrebbe richiedere meno energia e consumo rispetto a Maglev e ferrovia convenzionale ad AV.

Anche per il sistema di trasporto il sistema Ironlev (Magrail) consumerà meno energia rispetto a treni convenzionali ad AV.

Effetti ambientali

Quando si prendono in esame i termini di utilizzo del suolo, Maglev e i tipi di trasporto Hyperloop sono da considerare come strutture in elevazione con risparmi nell'uso del suolo.

Inoltre, grazie alla tecnologia *contactless* utilizzata, i sistemi di trasporto Maglev e Hyperloop, generano meno rumore e i valori di vibrazione sono più contenuti rispetto a treni convenzionali ad AV.

Confronto per una futura adozione di un sistema

Un confronto tra i sistemi ad alte velocità AV, MAGLEV, HYPERLOOP, IRONLEV (MAGRAIL) con la classica metodologia di analisi costi-benefici è molto opinabile soprattutto per la valutazione dei costi-benefici attuali e soprattutto a lungo termine, generando notevoli dubbi su una eventuale scelta.

Inoltre alcuni sistemi non sono ancora stati sperimentati per un periodo affidabile e quindi il livello di conoscenza sull'esercizio del sistema e sui relativi costi non è ancora noto.

Quindi l'approccio di studio comparativo attraverso la Fase 1, ossia una definizione comparativa del **che cosa** debba essere progettato in una futura cornice più generale di promozione, impianto e integrazione di un nuovo sistema, potrebbe essere lo studio più adeguato.

Esso può essere un utile e fondamentale documento di indirizzo per decisioni successive.

Prof. Ing. Guido Caposio