



Disamina dei sistemi a levitazione magnetica dal punto di vista dell'ingegneria dei trasporti: antefatti e prospettive future

Magnetic levitation systems assessment from transport engineering point of view: background and future prospects

Giovanni LANZARA¹
Gino D'OVIDIO^{1(*)}
Haitao LI²
Zigang DENG^{2(**)}
Weihua ZHANG²

Sommario - Questo articolo esamina e riassume le caratteristiche tecnologiche dei sistemi di trasporto a levitazione magnetica (Maglev) dal punto di vista dell'ingegneria dei trasporti, fornendo una sintesi dello stato dell'arte internazionale, delle attività di ricerca e delle applicazioni più significative degli ultimi cinque decenni.

Le principali fasi di sviluppo dei sistemi Maglev sono inserite ed illustrate all'interno del più ampio contesto evolutivo del sistema di trasporto ferroviario.

L'obiettivo dell'articolo mira a categorizzare e spiegare chiaramente i principi di funzionamento, le tecnologie ed i campi di applicazione dei diversi sistemi di trasporto Maglev.

Prestazioni, potenzialità e limiti sono analizzati in comparazione a quelli del sistema ferroviario tradizionale. Sono inoltre evidenziati gli argomenti di ricerca ancora da sviluppare.

Particolare attenzione è posta ai sistemi Maglev con tecnologia in superconduzione ad alta temperatura critica; in merito sono riportate le esperienze italiana e cinese.

Infine, viene esaminata l'attuale frontiera della ricerca incentrata sullo sviluppo dei futuristici sistemi di trasporto intubati ed evacuati (ETT) con veicoli Maglev ad altissima velocità (prossima a 1.000 km/h). A tal riguardo sono valutate le potenzialità ed i principali aspetti scientifici e tecnologici che necessitano ancora di essere approfonditi e risolti.

Summary - This article reviews and summarizes the technological characteristics of magnetic levitation (Maglev) transport systems from a transport engineering point of view, providing a summary of the international state of the art, research activities and most significant applications over the last five decades.

The main development phases of the Maglev systems are included and illustrated in the broader context of the evolutionary process of the railway transport system.

This paper aims to categorize and clearly explain the basic principles, technologies and application fields of different Maglev transportation systems.

Performances, potentials and limits of Maglev systems are analyzed in comparison with those of traditional wheel-on-rail based ones. Additionally, Maglev research needs are included.

Particular attention is paid to Maglev systems based on high critical temperature superconductivity technology: on this, the Italian and Chinese experiences are reported.

Finally, the current research frontier focused on the development of futuristic evacuated tube transport (ETT) systems with very high speed (close to 1,000 km/h) Maglev vehicles is examined. In this respect, the potential and the main scientific and technological aspects that still need to be explored and resolved are highlighted.

(*) G. D'OVIDIO (gino.dovidio@univaq.it).

(**) Z. DENG (deng@swjtu.cn).

¹ Università di L'Aquila, L'Aquila, Italia.

² State Key Laboratory of Traction Power Southwest Jiaotong University, Chengdu, China.

(*) G. D'OVIDIO (gino.dovidio@univaq.it).

(**) Z. DENG (deng@swjtu.cn).

¹ University of L'Aquila, L'Aquila, Italy.

² State Key Laboratory of Traction Power Southwest Jiaotong University, Chengdu, China.

1. Introduzione

Per molto tempo lo sviluppo prestazionale del sistema di trasporto ferroviario è stato guidato dall'esigenza di perseguire velocità operative sempre più elevate. Il tutto entro i limiti imposti dalla configurazione dei vincoli meccanici del sistema di contatto ruota-rotaia (WoR) attraverso il quale si esplicano le forze di sostentazione, guida e trazione del veicolo.

Il valore massimo di aderenza oltre il quale inizia lo slittamento della ruota, l'insorgere di coppie resistive e di fenomeni dinamici anomali, definisce, di fatto, i limiti di velocità ed il campo di funzionamento del sistema WoR.

Le soluzioni ingegneristiche più all'avanguardia in campo ferroviario utilizzano la levitazione magnetica (Maglev) per sostituire le forze di contatto con forze magnetiche in grado di sostentare, guidare e spingere il veicolo lungo il binario.

In termini generali, la levitazione magnetica è una tecnologia che consente ad un oggetto di rimanere sospeso nello spazio in una posizione fissa in assenza di supporto che non sia diverso da un campo magnetico: pertanto le forze magnetiche sono utilizzate per contrastare gli effetti delle accelerazioni (gravitazionali o di qualsiasi altro tipo) agenti sul corpo stesso.

La tecnologia Maglev è attualmente utilizzata in vari campi quali quelli: energetico (turbine eoliche), aerospaziale (sistemi di lancio), nucleare (centrifuga del reattore), civile (impianti di divertimento, ascensori), biomedico (pompa cardiaca), industriale (trasportatori) e così via [1]. L'elemento che accomuna tutte queste applicazioni è la mancanza di contatto fisico e quindi l'assenza di fenomeni di attrito ed usura tra le parti. Per quanto riguarda le applicazioni trasportistiche, il funzionamento dei sistemi Maglev si basa su forze che nascono dall'interazione di campi magnetici tra veicolo e binario. In tal caso i veicoli sono privi di ruote, assi e sistemi di trasmissione. Inoltre, l'assenza di contatto consente di svincolare l'accelerazione e la decelerazione veicolate dai limiti fenomenologici propri dell'aderenza ruota-rotaia.

Come è noto, la ricerca di nuove modalità di trasporto sempre più veloci ed efficienti è strettamente connessa alle caratteristiche dei modelli di sviluppo socio-economico dei paesi più avanzati. In merito, la Fig. 1 illustra il trend evolutivo della velocità operativa del trasporto ferroviario in funzione delle principali epoche storiche che hanno caratterizzato lo sviluppo socio-economico degli ultimi secoli. Più in dettaglio:

- La prima rivoluzione industriale della seconda metà del XVIII secolo ha coinciso con l'introduzione delle macchine a vapore. L'alta capacità di trasporto di passeggeri e merci, unitamente alle velocità (circa 80 km/h) che si potevano raggiungere apparvero eccezionali per quell'epoca e quindi il sistema di trasporto ferroviario si diffuse rapidamente a livello internazionale.

1. Introduction

For a long time, the performance development of the rail transport system has been driven with the main aim of pursuing ever higher operating speeds.

All this within the limits imposed by the configuration of the mechanical constraints of the wheel-on-rail (WoR) contact system through which the support, driving and traction forces of the vehicle are expressed.

The maximum value of adherence beyond which wheel slip begins, the onset of resistive torques and abnormal dynamic phenomena, in fact, define the speed limits and the operating range of the WoR system.

The most appealing engineering solutions on rail field are based on the use of magnetic levitation (Maglev) method in order to replace the contact forces with magnetic forces capable of supporting, guiding, and propelling the vehicle on the guideway.

In general terms, magnetic levitation is a technology by which an object is suspended in space in a fixed position without any support other than a magnetic field, hence magnetic forces are used to counteract the effects of accelerations (e.g., gravitational or any other type) acting on the object itself.

Maglev technology is currently used in various fields including clean energy (wind turbines), aerospace systems (space launch), nuclear engineering (centrifuge of nuclear reactor), civil engineering (fun, elevator), biomedical engineering (heart pump), industrial system (conveyors) and so on [1]. The common element in all these applications is the lack of contact and therefore the absence of wear and friction.

Concerning transport applications, the Maglev trains moving over magnetic fields that are established between the vehicle and its guideway allow wheels, axles, and transmission systems to be avoided on board. Their non-friction dependence means that acceleration and deceleration are not limited by wheel-rail adhesion.

As is well known, the reasons for seeking new, ever faster modes of transport are closely linked to the needs inherent in the socio-economic development models of the most advanced countries.

In this respect, Fig. 1 illustrates, for the railway sector, the evolutionary trend in operating speed according to the main historical periods that have characterised economic and social development in recent centuries. More in details:

- *The first industrial revolution coincided with the use of the steam engine in the second half of the 18th century. The high capacity for transporting passengers and goods together with the speeds that could be reached (about 80 km/h) appeared exceptional for that time and therefore the railway transport system spread rapidly throughout the world.*

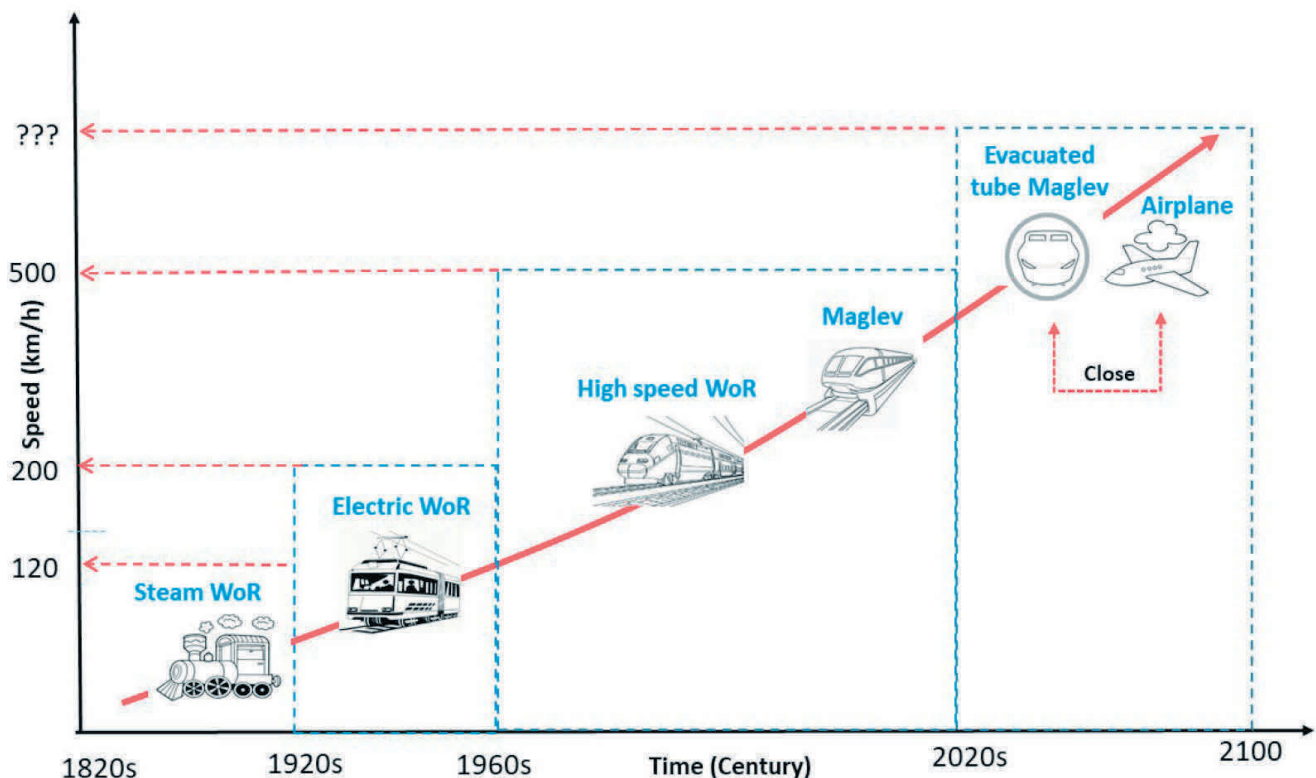


Figura 1 – Trend evolutivo delle velocità nel trasporto ferroviario.

Figure 1 – Evolutionary speed trend of rail transit over time.

- La seconda rivoluzione industriale, convenzionalmente iniziata con l'uso estensivo dell'elettricità, dei prodotti chimici e del petrolio, ha permesso di realizzare sistemi ferroviari con velocità di transito prossime ai 200 km/h;
- La terza rivoluzione, coincidente con l'avvento dell'automazione industriale conseguita anche a seguito dello sviluppo dell'elettronica (prima analogica e poi digitale), della meccanica e dei sistemi ICT (*Information and Communication Technology*), ha consentito di raggiungere velocità di circa 300 km/h con sistemi ferroviari tradizionali WoR e di sviluppare, contemporaneamente, sistemi Maglev a 400 km/h;
- L'era post-industriale, che possiamo ragionevolmente assumere coincidente con il nostro presente e prossimo futuro, è connessa all'avvento dirompente e pervasivo delle tecnologie digitali (*Internet of Things*), dei dispositivi personali ICT, dell'intelligenza artificiale, nonché dei materiali innovativi e di nuovi dispositivi per la produzione di energia da fonti rinnovabili. In questo particolare periodo, i limiti di velocità per il settore ferroviario sono teoricamente individuabili ma restano ancora da confermare sperimentalmente.

All'interno di questo quadro evolutivo, è lecito chiedersi quali saranno i limiti di velocità nei prossimi anni. La risposta a questa domanda può essere delineata, con

- *The second industrial revolution, conventionally started with the introduction of electricity, chemicals and oil. It has led to reach rail transit speeds close to 200 km/h.*
- *The third revolution, which coincided with the advent of industrial automation, partly as a result of the technological development of electronics (first analogue and then digital), mechanics and ICT (Information and Communication Technology) systems, made it possible to reach speeds of around 300 km/h with traditional WoR railway systems and to develop, at the same time, Maglev systems at 400 km/h;*
- *The post-industrial era, which we can reasonably assume coincides with our present and near future, is due to the disruptive and pervasive advent of digital technologies (Internet of Things), personal ICT devices, artificial intelligence, as well as innovative materials and new devices for energy production from renewable sources. In this particular period, speed limits for the railway sector are theoretically identifiable but remain to be experimentally confirmed.*

Within this evolving scenario, it is fair to ask what the speed limits of rail transit will be in the coming years. The answer to this question can only be outlined, with a sufficient degree of reliability, starting from an in-depth analysis of the international research and development activities that industry and scientific community have been car-

un sufficiente grado di affidabilità, solo partendo da un'analisi approfondita delle attività internazionali di ricerca e sviluppo che l'industria e la comunità scientifica hanno portato avanti negli ultimi decenni nel campo dei sistemi di trasporto guidati.

In ogni caso, si prevede che le velocità con cui in futuro si muoveranno passeggeri e merci, subiranno un incremento straordinario.

A questo proposito, le tendenze di ricerca sono incentrate sullo studio di nuovi sistemi di trasporto terrestri con velocità prossime a quelle degli aerei. Tuttavia, a differenza di quest'ultimi che volano ad alta quota in atmosfera a ridotta pressione, i veicoli terrestri viaggiano in condizioni atmosferiche prossime al suolo che, di fatto, rappresentano uno dei fattori limitanti la velocità massima perseguibile.

Con l'intento di superare questa barriera fisica, una delle attuali frontiere della ricerca riguarda lo sviluppo di veicoli Maglev che viaggiano in ambiente artificiale intubato tale da riprodurre le condizioni di pressione atmosferica simili o addirittura inferiori a quelle in cui volano gli aerei [2].

Questa nuova sfida tecnologica è certamente fondata sulla consapevolezza che le esigenze di mobilità del XXI secolo non potranno essere supportate da tecnologie proprie del XIX e XX secolo.

Con riferimento ai sistemi di trasporto Maglev, e dal punto di vista dell'ingegneria dei trasporti, gli obiettivi di quest'articolo mirano a: i) descrivere e classificare le principali tecnologie, ii) analizzare le prestazioni ed i limiti tecnologici e iii) valutare lo stato dell'arte e le prospettive dei sistemi di trasporto intubati (ETT) per applicazioni ad altissima velocità.

Sono inoltre illustrate le esperienze italiane e cinesi sulla ricerca e sviluppo dei sistemi Maglev in superconduzione ad alta temperatura.

Questo articolo è organizzato nel seguente modo. Il paragrafo 2 illustra l'excursus storico del processo di sviluppo dei sistemi di trasporto Maglev. La categorizzazione delle tecnologie, i principi di funzionamento e le applicazioni dei sistemi Maglev sono illustrati nel paragrafo 3. Nel paragrafo 4 sono analizzati lo stato dell'arte della ricerca e le potenzialità dei sistemi ETT. Le conclusioni sono riportate paragrafo 5.

2. Retrospective dei sistemi Maglev

La tecnologia di base dei sistemi di trasporto Maglev è unanimemente considerata la più innovativa. Storicamente, il primo sistema di trasporto Maglev è stato concepito da F. S. SMITH nel 1907 [3]. Nel 1912, E. BACHELET ottenne un brevetto statunitense per un "apparato levitante di trasporto" [4]. In seguito, nel 1937, H. KEMPER ottenne in Germania il primo [5] di una serie di brevetti per treni a levitazione magnetica, spinti da motori linea-

rying out in last decades in the field of guided transport systems.

In any case, as we can foresee that the speeds at which passengers and goods will move, will undergo an extraordinary increase.

In this respect, new research and development trends are focusing on the study of new ground transport systems with speeds close to those of aircraft. However, unlike aircraft, which fly at high altitude in a low-pressure atmosphere, ground vehicles travel in atmospheric conditions that are close to the ground, that are one of the factors limiting the maximum speed that can be achieved. Therefore, one of the current frontiers of research is focused on the development of Maglev vehicles that travel in an artificially intubated environment that reproduces atmospheric pressure conditions similar to or even lower than those in which aircraft fly [2].

This new technological challenge is certainly founded on the understanding that the mobility needs of the 21st century cannot be supported by 19th and 20th century technologies.

With reference to Maglev transport systems, and from the point of view of transport engineering, the objectives of this article concern: i) the description and classification of the main technologies, ii) the performance analysis and technological limitations and iii) the evaluation of the state of the art and perspectives of intubated and evacuated transport systems (ETT) for very high speed applications.

In addition, Italian and Chinese research experience on the development of Maglev systems based on high temperature superconductors are also illustrated.

This paper is organized as follows. Section 2 illustrates the Maglev train retrospectives. The categorization of Maglev technologies, their operating principles and applications are explained in section 3. The state of the art of research and the potential of ETT systems are illustrated in section 4.

And remarks are in Section 5.

2. Maglev systems retrospectives

The Maglev transport system is commonly considered as an innovative technology. Historically, the first Maglev transportation system was conceived by F. S. SMITH in 1907 [3]. In 1912, E. BACHELET obtained a US patent for a "levitating transmitting apparatus" [4]. Afterwards, in 1937, H. KEMPER awarded a first [5] of a series of German patents for magnetic levitation trains propelled by linear motors. In the 1959, G. R. POLGREEN filed a US patent on magnetic system of transportation [6]. Since then, an extensive patent activity on the subject has been developed worldwide. Fig. 2 illustrates a current ranking of the top 10 Maglev patenting countries, which is ordered by number of patents: China (27.11%), Japan (24.66%), Germany

ri. Nel 1959, G. R. POLGREEN depositò un brevetto americano sul sistema di trasporto a levitazione magnetica [6]. Da allora, una vasta attività inventiva sull'argomento è stata sviluppata a livello internazionale. In merito, la Fig. 2 illustra la classifica dei primi 10 paesi espressa in percentuale al numero di brevetti depositati nel campo della levitazione magnetica: Cina (27,11%), Giappone (24,66%), Germania (20,44%), USA (10,69%), Corea del Sud (4,37%), Francia (2,23%), Regno Unito (2,23%), Russia (1,25%), Italia (0,71%) e Canada (0,57%) [7]. I dati sono indubbiamente significativi dell'innovazione conseguita attraverso le attività di ricerca svolte nei singoli paesi.

Storicamente, gli anni compresi tra il 1950 ed il 1970 hanno rappresentato un periodo fruttuoso e di estrema innovazione nel settore ferroviario. Infatti, nell'ambito dell'evento internazionale (*International Transportation Exposition*, Washington, 1972) più importante di settore, furono presentate due tecnologie emergenti, entrambe basate sul principio della levitazione, riguardanti:

- treni a levitazione con cuscini d'aria (TACV), con utilizzo di aria compressa;
- treni a levitazione magnetica, con uso di campi magnetici.

A partire dagli anni '60 ebbe inizio la costruzione sperimentale dei primi sistemi di trasporto a levitazione, basati dapprima sulla tecnologia a cuscini d'aria e successivamente su quella magnetica.

I sistemi TACV utilizzano dispositivi a "reazione diretta", noti anche come "cuscino d'aria", per sostenere e guidare il veicolo attraverso una massa d'aria opportunamente creata e spostata [8].

La Fig. 3 illustra tre prototipi di treni TACV europei, quali: l'Aérotrain (Fig. 3a), l'IAP2 (Istituto Aeronautico Palermo modello 2) (Fig. 3b) e l'IAP3 (IAP modello 3) (Fig. 3c).

L'Aérotrain è stato sviluppato in Francia (1965-1977) da un gruppo di scienziati guidati da J. BERTIN [9]: furono adottati una guidovia a forma di "L" ed un motore aeronautico per la propulsione.

I sistemi IAP2 e IAP3, entrambi con guidovia a forma di "U", furono sviluppati in Italia da un gruppo di ricercatori guidati dal Prof. G. LANZARA nei primi anni '70 all'Università di Palermo (Italia). Per la propulsione del veicolo IAP2 fu adottato un motore aeronautico, mentre nel veicolo IAP3, sperimentato su una linea di prova costru-

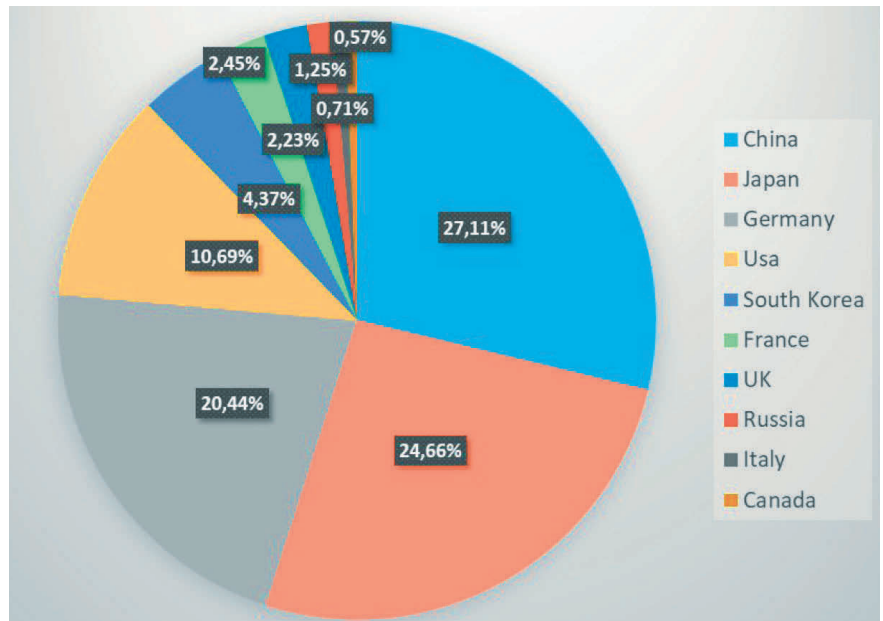


Figura 2 – Classifica dei primi 10 paesi per numero di brevetti Maglev.
Figure 2 – Top 10 Maglev patenting countries.

(20.44%), USA (10.69%), South Korea (4.37%), France (2.23%), UK (2.23%), Russia (1.25%), Italy (0.71%) and Canada (0.57%) [7]. The data are significant of the extent of activities carried out in this specific field by different countries.

Historically, the years from 1950 to 1970 represented a fruitful and innovative era in the rail sector. The U.S. International Transportation Exposition (Washington, 1972) represented the most important event in the world to showcase two emerging technologies both based on the principles of levitation:

- tracked Air Cushion Vehicle (TACV) based on the use of compressed air;
- magnetic levitated train based on the use of magnetic field.

In the early 1960s, the construction of levitation transport systems began, which is firstly constructed with the air cushions technology and then the magnetic one was introduced.

The TACV suspension is based on the "direct reaction" devices, known as air-cushion apparatuses, by means the vehicle is sustained and guided by an appropriately moved mass of air [8].

Fig. 3 illustrates three European TACV train prototypes such as: Aérotrain (Fig. 3a), IAP2 (Istituto Aeronautico Palermo model 2) (Fig. 3b) and IAP3 (IAP model 2) (Fig. 3c).

The Aérotrain was developed in France from 1965 to 1977 by a group of scientists led by J. BERTIN [9]: a "L" shaped guideway and aeronautical propeller engine were adopted.



(Fonte - Source: <https://katcal.wordpress.com>)

Figura 3a – Aerotrain (Francia) - Sistema sperimentali TACV.

Figure 3a – Aerotrain (France) - TACV experimental system.



(Fonte - Source: <https://twnews.it/it-news/>)

Figura 3b – Treno IAP2 (Italia) - Sistema sperimentali TACV.

Figure 3b – IAP2 train (Italy) - TACV experimental system.



(Fonte - Source: <https://twnews.it/it-news/>)

Figura 3c – Treno IAP3 (Italia) - Sistema sperimentali TACV.

Figure 3c – IAP3 train (Italy) - TACV experimental system.

ta presso l'aeroporto di Trapani (Sicilia), furono adottati, in modo innovativo, un motore ad induzione lineare “a singolo lato” ed un sistema di sospensione attiva [10][11].

Le attività di ricerca e di sperimentazione dei sistemi TACV furono interrotte alla fine degli anni '70 a causa dei limiti intrinseci alla tecnologia, quali l'elevata potenza in gioco, le vibrazioni, il rumore ecc. Pertanto, le attività di ricerca nel settore dei trasporti innovativi furono orientate nello sviluppo delle tecnologie Maglev, come meglio illustrato nel paragrafo 3.

Il progresso raggiunto nel campo degli apparati di levitazione ha portato necessariamente anche allo sviluppo di motori lineari necessari a fornire al veicolo non solo la spinta ma anche la forza frenante in assenza di contatto.

Il concetto di funzionamento del motore lineare deriva da quello del motore rotativo in cui lo statore ed il rotore sono idealmente sezionati in direzione radiale e distesi su un piano in modo da creare due strutture parallele denominate rispettivamente primario e secondario. Nel motore lineare, il campo magnetico rotativo viene tra-

The IAP2 and IAP3 systems, both based on “U” shaped guideway, were developed by a research group led by Prof. G. LANZARA in the early 1970s at the University of Palermo (Italy).

An aircraft engine was adopted for propulsion of the IAP2 vehicle, while a “one-sided” linear induction motor and an active suspension were innovatively adopted in the IAP3 tested on a proving line built at Trapani airport (Sicily) [10][11].

The TACV research and test activities were interrupted at the end of the 1970s due to the technological inherent limits such as high-power requirement, vibration, noise etc.

The main research activities in this field were shifted into Maglev technologies development as illustrated in the Section 3.

The progress of levitation systems has also led to the development of linear motors necessary to provide not only propulsion but also braking force in the absence of contact.

The linear motor concept derived from the rotary motor in which the stator and the rotor are sectioned radially and layered on a plane so as to create two parallel structures called respectively primary and secondary. In analogy, the rotating magnetic field is transformed into translating one and the electromagnetic torque becomes a thrust (Fig. 4).

Among various kinds of linear motors, the linear induction motor (LIM) and the linear synchronous motor (LSM) are the most common configurations [12].

3. Maglev technologies

Based on the levitation physical principle, the main Maglev technologies for practical transport applications can be categorized into four types, as illustrated in Tab 1.

Although the PML technology is apparently simple, it has technical limitations due to its inherent instability that have hindered the practical use.

The EMS and EDS technologies applications have cur-

sformato in campo magnetico traslante e la coppia elettromagnetica in spinta (Fig. 4).

Tra le varie configurazioni, il motore lineare ad induzione (LIM) ed il motore sincrono lineare (LSM) rappresentano le tipologie più comuni [12].

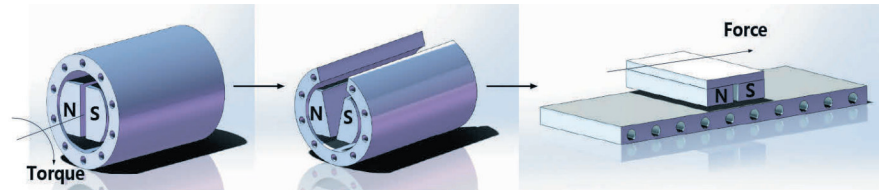


Figura 4 – Schema del processo di conversione da motore rotativo a motore lineare.

Figure 4 – Schematic diagram of conversion process from rotative to linear motor.

3. Tecnologie Maglev

Le principali tecnologie Maglev nel campo trasportistico, in relazione ai diversi principi fisici, possono essere classificate in quattro tipologie, così come illustrato nella Tab 1.

La tecnologia PML, pur se apparentemente semplice, presenta limiti tecnici dovuti essenzialmente alla sua in-

rently reached a high level of technological maturity and operational reliability.

The SML approach is based on the interaction between a superconductor and a magnetic field and it can be distinguished into two types: i) low temperature type I superconductors ii) high temperature type II superconductors.

Tabella 1 – Table 1

Classificazione delle tecnologie Maglev
Maglev technologies categorization

Acronimo Acronym	Tecnologia di levitazione Levitation technology	Dispositivi Devices	Tipo di forze Type of forces	Tipo di stabilità di levitazione Type of levitation stability	Campo di applicazione trasportistico Application transport field
PML	Levitazione con Magneti Permanenti Permanent Magnet Levitation	Magneti Permanenti Permanent Magnets	Repulsive o attrattive Repulsive or attractive	Instabile Unstable	Bassa-media velocità Low-to-medium speed
EMS	Sospensione Elettromagnetica Electromagnetic suspension	Elettromagneti & metallo conduttivo Electromagnet & conductive metal	Attrattive Attractive	Instabile Unstable	Bassa-media velocità Low-to-medium speed Alta velocità High speed
EDS	Sospensione Elettrodinamica Electrodynamic suspension	Magneti Permanenti & metallo conduttivo Permanent Magnets & conductive metal	Repulsive Repulsive	Stabile Stable	Bassa-media velocità Low-to-medium speed
		Low-temperature Superconductors & conductive coils	Repulsive Repulsive		Alta velocità High speed
SML	Levitazione Magnetica Superconduttiva Magnetic Levitation	Bassa temperatura I° Tipo superconduttori & campi magnetici Low temperature Type I superconductors & magnetic fields	Repulsive Repulsive	Stabile Stable	Bassa-media velocità Low-to-medium speed
					Alta velocità High speed
		Alta temperature II° Tipo superconduttori & Magneti Permanenti High-temperature Type II superconductors & Permanent Magnets	Repulsive & attrattive Repulsive & attractive	Stabile Stable	Bassa-media velocità Low-to-medium speed
					Alta velocità High speed

trinseca instabilità che, di fatto, ne hanno limitato l'uso pratico.

Di contro, le tecnologie EMS e EDS hanno attualmente raggiunto un alto livello di maturità ed affidabilità operativa.

La tecnologia SML si basa sull'interazione tra campi magnetici e materiali superconduttori che, a loro volta, possono essere distinti in: i) superconduttori di I° tipo a bassa temperatura e ii) superconduttori di II° tipo ad alta temperatura.

3.1. Levitazione con magneti permanenti (PML)

Il principio di funzionamento del PML e le sue applicazioni sono di seguito illustrate.

3.1.1 Principio di funzionamento PML

Il principio di funzionamento del PML (Fig. 5a) si basa su forze statiche repulsive o attrattive che si generano tra due magneti (PMs).

Nel caso di forze repulsive (Fig. 5b), il sistema è stabile nella direzione verticale ma non in quella laterale: occorrono pertanto dispositivi ausiliari di guida laterale (ruote, etc.). Per quanto concerne il caso di forze attrattive (Fig. 5c), il sistema è instabile nella direzione verticale e pertanto sono necessarie ruote ausiliari o elettromagneti a controllo attivo per limitarne il movimento.

Nota la densità di flusso magnetico di un insieme di PMs, la forza può essere calcolata con il metodo del tensore di Maxwell; le componenti della forza di levitazione si ricavano dalla seguente relazione.

$$\begin{aligned} F_z &= \frac{L_x}{2\mu_0} \int_{-\infty}^{+\infty} (B_y^2 - B_{z0}^2) dy \\ F_y &= \frac{L_x}{\mu_0} \int_{-\infty}^{+\infty} (-B_{z0}) B_y dy \end{aligned} \quad (1)$$

dove F_z è la forza di sustentazione, F_y è la forza di guida, B_y e B_{z0} sono rispettivamente le componenti orizzontali e

3.1. Permanent magnet levitation (PML)

PML working principle and its applications are illustrated below.

3.1.1 PML working principle

PML working principle (Fig. 5a) is based simply on static repulsive or attractive forces generated between two magnets (PMs).

When using the repulsive levitation force (Fig. 5b), it is stable in the vertical direction but not in the lateral. Hence, the guidance wheel should be added in this system. However, as for using the attractive force (Fig. 5c), it is not stable in the vertical direction, wheels or active-controlled electromagnets are needed to limit its motion.

After obtaining the magnetic flux density of a PMs block, the force between two PMs can be calculated by Maxwell tensor method. As for the levitation, it can be described as following equation.

$$\begin{aligned} F_z &= \frac{L_x}{2\mu_0} \int_{-\infty}^{+\infty} (B_y^2 - B_{z0}^2) dy \\ F_y &= \frac{L_x}{\mu_0} \int_{-\infty}^{+\infty} (-B_{z0}) B_y dy \end{aligned} \quad (1)$$

where F_z is the levitation force, F_y is the guidance force, B_y is the transverse component of the magnetic flux density, B_{z0} represents the vertical component of magnetic flux density on the surface of PM, and L_x is the length of the magnet along the direction of movement of the vehicle. From relation (1), it can be seen that the guidance force is a negative value which is unstable.

3.1.2 PML applications

The PML technology has found application for short-distance links such as the AirRail link (e.g. Birmingham airport, UK) (Fig. 6a) [13]. It may have potential for use in applications such as light-duty transport systems, and

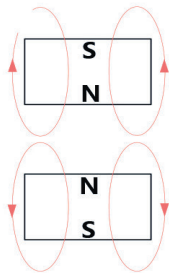


Figura 5a – Principio di funzionamento - Schema di PML.

Figure 5a – Working principle - PML scheme.

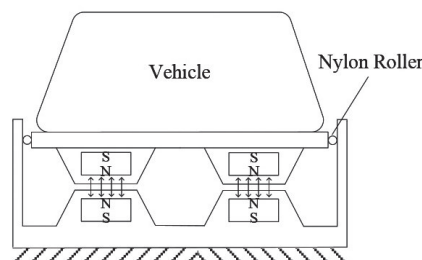


Figura 5b – Applicazione repulsiva - Schema di PML.

Figure 5b – Repulsive application - PML scheme.

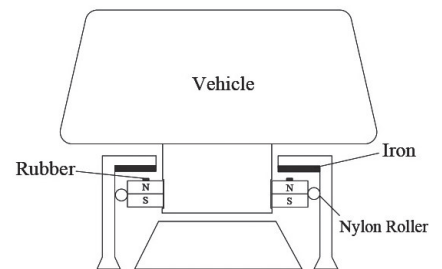


Figura 5c – Applicazione attrattiva - Schema di PML.

Figure 5c – Attractive application - PML scheme.

verticali della densità di flusso magnetico sulla superficie del magnete ed L_s è la lunghezza del magnete lungo la direzione del moto del veicolo.

Dalla relazione (1) si evince che la forza di guida è negativa e pertanto è instabile.

3.1.2 Applicazioni PML

La tecnologia PML ha trovato applicazione per collegamenti a breve distanza (es. AirRail, aeroporto di Birmingham, UK) (Fig. 6a) [13]. Tale metodo di levitazione trova potenziale uso in applicazioni per sistemi di trasporto leggero; a riguardo sono state costruite alcune configurazioni sperimentali (PMs con configurazione di Halbach) come quella sperimentale MagTube (USA), illustrata in Fig 6b [14].

3.2. Sospensione Elettromagnetica (EMS)

Il principio di funzionamento e le applicazioni della tecnologia EMS sono di seguito illustrate.

3.2.1. Principio di funzionamento EMS

La tecnologia EMS utilizza forze attrattive generate tra un elettromagnete e un materiale ferromagnetico (Fig. 7a). Nelle applicazioni trasportistiche, le forze attrattive tra gli elettromagneti posizionati nel carrello del veicolo e la struttura metallica del binario sono usate ai fini della sospensione del veicolo stesso. A causa delle caratteristiche del circuito magnetico, questo metodo di levitazione è intrinsecamente instabile e di conseguenza richiede sofisticati e precisi sistemi di controllo per mantenere costante (circa 8 mm) l'altezza di traferro.

Inoltre le applicazioni EMS ad alta velocità necessitano di dispositivi ausiliari di guida per limitare i movimenti laterali del veicolo.

Il sistema EMS permette al treno di levitare in tutte le condizioni del moto, anche da fermo. La propulsione del veicolo è affidata ad un motore lineare distribuito lungo la guidovia.

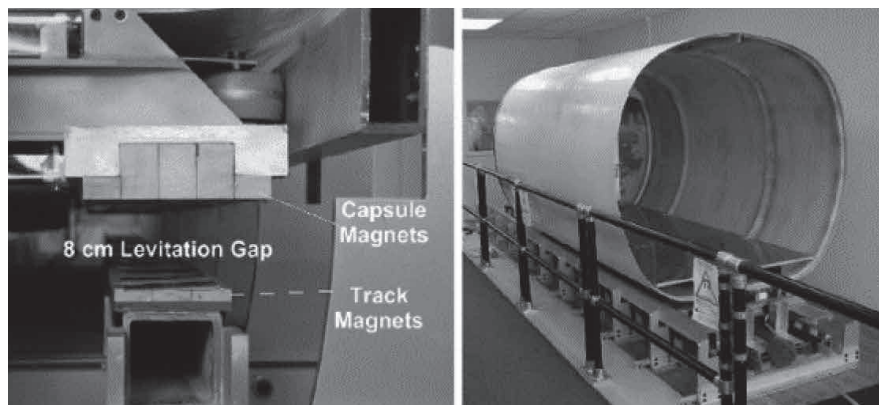
Gli schemi di funzionamento del sistema EMS, in funzione degli ambiti applicativi, possono diversificarsi come di seguito:



(Fonte - Source: https://zh.wikipedia.org/wiki/File:Birmingham_International_Maglev.jpg)

Figura 6a – AirRail Link in Birmingham (UK) - Applicazione di sistema PML.

Figure 6a – AirRail Link in Birmingham (UK) - PML system application.



(Fonte - Source: LONG G A, FISKE O J, PADEN B E. Design of a small-scale prototype for a stabilized permanent magnet levitated vehicle. Dynamic Systems and Control Conference. 2009, 48937: 211-216))

Figura 6b – MagTube (USA) - Applicazione di sistema PML.

Figure 6b – MagTube (USA) - PML system application.

some special static configurations (such as the Halbach array of PMs) have also been built, such as experimental that (Fig 6b) of MagTube (USA) [14].

3.2. Electromagnetic Suspension (EMS)

The operating principle and applications of EMS technology are outlined below.

3.2.1. EMS working principle

The EMS is realized based on the attractive force generated between an electromagnet and a ferromagnetic material (Fig. 7a). In practical transport application, the attractive force between electromagnets on the vehicle undercar-

- 1) sistema ad alta velocità (Fig. 7b) con apparati di sospensione separati da quelli di guida; il veicolo è propulso da LSM, così come avviene, ad esempio, nel sistema tedesco Transrapid ad alta velocità [15];
- 2) sistema a bassa-media velocità (Fig. 7c) con funzioni di sospensioni integrate a quella di guida e con propulsione LIM, così come avviene, ad esempio, nei sistemi: Linimo [16] (Giappone), ECOBEE [17] (Corea del Sud), Changsha [18] e S1 a Pechino [19] (Cina).

La forza di sostentazione può essere calcolata attraverso la seguente formula [20]:

$$F_z(i, c) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[\frac{i(t)}{c(t)} \right]^2 \quad (2)$$

Dove $F(i, c)$ è la forza di attrazione dell'elettromagnete, N è il numero di spire dell'avvolgimento di eccitazione dell'elettromagnete, A è l'area del polo del nucleo, μ_0 è la permeabilità dell'aria, $c(t)$ è il traferro e $i(t)$ è la corrente istantanea dell'avvolgimento di controllo. Si può vedere che la forza di sospensione è correlata positivamente con la corrente e negativamente con il traferro, come mostrato in Fig. 8.

In assenza dell'apparato di controllo, la forza di levitazione è proporzionale al quadrato della corrente ed inversamente proporzionale al quadrato del traferro (Fig. 8). Se l'apparato di controllo a circuito chiuso viene aggiunto al sistema, la sospensione diventa stabile.

3.2.2 Applicazioni EMS

La tecnologia EMS si diversifica a seconda delle applicazioni che possono specializzarsi in alta o bassa-media velocità, così come di seguito illustrato.

3.2.2.1. EMS per alta velocità

Questa tecnologia è stata sviluppata in Germania quando, nel 1975, la società Thyssen Henschel ha integrato per la prima volta gli apparati di sospensione e propulsione in una sola unità, ponendo le basi dei sistemi

riage and the steel yoke of track is used for suspension. Due to the magnetic circuit features, this levitation method is inherently unstable and consequently sophisticated and precise active control systems are required to maintain the uniform air gap (around 8 mm). In addition, high-speed EMS applications require guidance aids to limit lateral vehicle movements.

The EMS system allows the train to levitate at all motion conditions, even when stationary. Vehicle propulsion is provided by the linear motor distributed along the guideway.

The EMS system schemes can be distinguished into the following two versions:

- 1) high speed (Fig. 7b) system with separated suspension and guidance functions in which the vehicle is driven by LSM, such as high-speed German Transrapid [15] system;
- 2) low-to-medium speed (Fig. 7c) system with integrated suspension and guidance functions such as the four low-to-medium speed (urban) operative EMS lines in which the vehicle is driven by LIM, such as Japanese Linimo line [16], the Korean ECOBEE line [17], the Changsha Line [18] and S1 line in Beijing [19].

The suspension force can be calculated through the following formula [20]:

$$F_z(i, c) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[\frac{i(t)}{c(t)} \right]^2 \quad (2)$$

Where $F(i, c)$ is the electromagnet attraction force, N is the number of turns of the electromagnet excitation winding, A is the area of the core pole, μ_0 is the air permeability, $c(t)$ is the air gap and $i(t)$ represents the instantaneous current of the control coil. It can be seen that the suspension force is positively correlated with current and negatively correlated with air gap, as shown in Fig. 8.

Without the control system, the levitation force is proportional to the square of the current and inversely to the square of the air gap, as shown in Fig. 8. If the closed-loop control system is added to the system, the suspension will become stable.

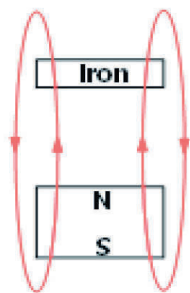


Figura 7a – Principi di funzionamento – Schema EMS.

Figure 7a – Working principle - EMS scheme.

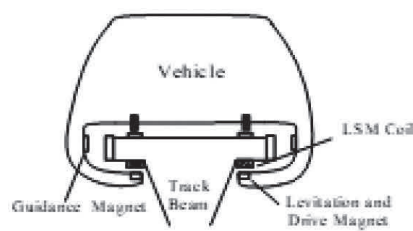


Figura 7b – Applicazione ad alta velocità – Schema EMS.

Figure 7b – High speed application - EMS scheme.

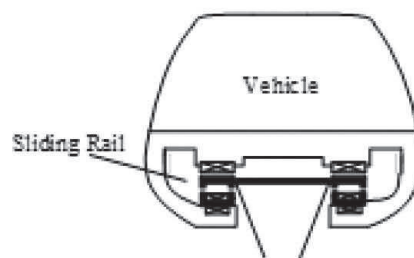


Figura 7c – Applicazione a bassa velocità – Schema EMS.

Figure 7c – Low speed application - EMS scheme.

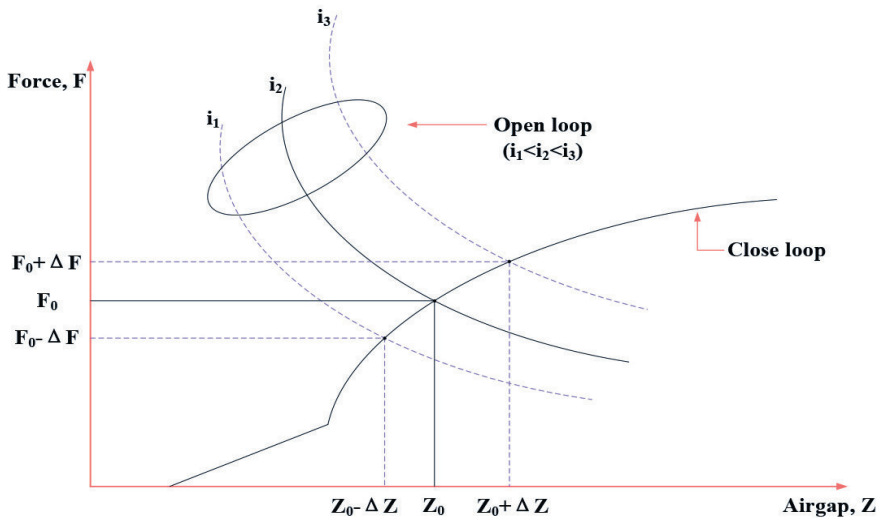


Figura 8 – Relazione tra la forza di attrazione, corrente e traferro nei casi di anello aperto ed anello chiuso.

Figure 8 – The relationship between the attraction force and the current and air gap in the cases of open loop and close loop.

TR. Nel 1983, è stata costruita in Germania la linea di prova (TVE Emsland) lunga 21,5 km [21]. Nel 1988, la velocità del sistema TR06 ha raggiunto i 412.6 km/h per poi arrivare a 450 km/h nel 1993 con il sistema TR07. La versione commerciale TR08 è operativa a Shanghai, in Cina (Fig. 9a) [22][23].

Anche la Cina ha iniziato, negli ultimi anni, a sviluppare in proprio sistemi Maglev ad alta velocità con tecnologia EMS. Nel 2018, la proposta tecnica del sistema di trasporto Maglev da 600 km/h ha superato la revisione degli esperti a Qingdao e nel 2019, il prototipo di prova è stato completato (Fig. 9b).



(Fonte - Source: http://toutiao.chinaso.com/sh/detail/20170929/1000200033111641506651351688715072_1.html)

Figura 9a – Impianto di prova Emsland Transrapid Germania - Applicazione EMS per alte velocità.

Figure 9a – Emsland Transrapid test facility, Germany - EMS high speed applications.

3.2.2. EMS Applications

Electromagnetic suspension applications can be classified into low-to-medium and high speed, as follows.

3.2.2.1 High speed EMS

This technology was developed in Germany when, in 1975, the Thyssen Henschel company integrated suspension and propulsion equipment into a single unit for the first time, laying the foundations for the TR. In 1983, TVE Emsland test line with a length of 21.5 km was built in Germany [21]. In 1988, the speed of TR06 reached 412.6 km/h. In 1993, the speed of TR07 reached 450 km/h. And then, TR08 was commercially applied in Shanghai, China (Fig. 9a) [22][23].

China began to study high speed EMS Maglev in recent years. In 2018, the technical proposal of the 600 km/h

Maglev transportation system passed the experts review in Qingdao. In 2019, the Maglev test prototype was finished off production, as shown in Fig. 9b.

3.2.2.2 Low to medium speed EMS

EMS technology for medium and low speeds has also been developed in Japan, where it has now reached sufficient maturity. In 1974, Japan Airlines (JAL) purchased the company Krauss-Maffei patented TR04. As a basis, the low-to-medium speed Maglev train HSST was researched, and HSST-01 to HSST-05 five test models were developed [24]. Moreover, the Japanese urban transit Linimo line [25] was



(Fonte - Source: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1634379742347237430&wfr=spider&for=pc>)

Figura 9b – Prototipo Maglev in Qingdao, Cina - Applicazione EMS per alte velocità.

Figure 9b – Maglev test prototype in Qingdao, China - EMS high speed applications.

3.2.2.2 EMS per velocità medio-basse

La tecnologia EMS per medio-basse velocità è stata sviluppata in Giappone dove ha ormai raggiunto una sufficiente maturità.

Nel 1974, la Japan Airlines (JAL) ha acquistato la società Krauss-Maffei ed ha brevettato il sistema TR04. Inizialmente è stato realizzato il sistema Maglev HSST e successivamente sono stati sviluppati altri cinque modelli di prova (HSST-01; HSST-05) [24].

È stato inoltre realizzato il sistema Maglev Linimo [25] che opera in ambito urbano sulla linea Tobu Kyuryo a Nagoya dal 2005 (Fig. 10a).

Anche la Corea del Sud ha sviluppato un proprio sistema Maglev a bassa-media velocità partendo dalla costruzione, nel 1999, di un prototipo (UTM-01) successivamente migliorato. Nel 2004, è stata realizzata la versione UTM-02 per applicazioni commerciali. Nel febbraio 2016 è entrata in funzione la linea Maglev tra l'aeroporto di Incheon e la stazione Incheon Longyou [26] (Fig. 10b).

In Cina, oltre all'introduzione della tecnologia tedesca TR, sin dagli anni '80 alcuni istituti di ricerca come la *Southwest Jiaotong University* e la *National University of Defense Technology* hanno iniziato a studiare la tecnologia Maglev EMS per applicazioni a velocità medio-basse. L'Università Nazionale di Tecnologia della Difesa e altre unità di ricerca hanno sviluppato con successo nel 2012 il treno a magneti ibridi che è già stato testato per l'effettivo funzionamento. Al fine di promuovere l'applicazione dei treni Maglev in ambito urbano, il *Shanghai Research Center of Maglev Transport Technology*, insieme ad altre unità nazionali correlate, hanno sviluppato un treno Maglev ed una linea di prova lunga 1.500 m. La prima linea commerciale Maglev è stata messa in esercizio a Changsha (Fig. 10c) nel 2016 [27]. In questo specifico caso il sistema di controllo è stato fornito dalla *Southwest Jiaotong University* e da alcuni altri istituti. La seconda linea è in esercizio a Pechino dal 2017 (Fig. 10d) [28].



(Fonte - Source: <https://en.wikipedia.org/wiki/Linimo>)

Figura 10a – Sistema Linimo in servizio a Tobu Kyuryo Line in Nagoya, Giappone - Applicazione EMS per medio-basse velocità.

Figure 10a – Linimo operating on Tobu Kyuryo Line in Nagoya, Japan - EMS Low-to-medium speed application.

successfully operated over the Tobu Kyuryo Line in Nagoya since 2005, as shown in Fig. 10a.

In Korea, the development of low-to-medium speed Maglev train began very early. In 1999, the low-to-medium speed Maglev train UTM-01 was improved. In 2004, a study for the commercial operation for low-to-medium speed Maglev train based on UTM-02 was carried out. On February 2016, the Maglev line between Incheon airport and Incheon Longyou station was put into operation [26], as shown in Fig. 10b.

In addition to the introduction of Germany's TR technology, since the 1980s, some research institutes like Southwest Jiaotong University and National University of Defense Technology in China started to study the low-to-medium speed Maglev technology. National University of Defense Technology and other units started to develop the hybrid magnet Maglev train and successfully developed one in 2012, which has already been put into the actual operation test. In order to promote the application of low-to-medium Maglev trains in Shanghai urban transport, Shanghai Research Center of Maglev Transport Technology, united with other related domestic units, built a 1,500-m-long low-to-medium speed Maglev test line. The first low-to-medium speed commercial Maglev line of China was born in Changsha in 2016 [27], as shown in Fig. 10c. The control system was provided by Southwest Jiaotong University and some other institutes. And the second one was developed in Beijing in 2017 as shown in Fig. 10d [28].

3.2.3. Experience in EMS application

The application practice shows that the EMS vehicle are very sensitive to its own structure, elevated lines, and control systems. The small operating gap (approx. 8 mm) requires the system working with very small precision tolerances of the structure, complicating the construction constraints and therefore the costs.



(Fonte - Source: <http://www.kihoilbo.co.kr/news/articleView.html?idxno=638809>)

Figura 10b – Linea Maglev in Incheon, Corea - Applicazione EMS per medio-basse velocità.

Figure 10b – Maglev line in Incheon, Korea - EMS Low-to-medium speed application.



(Fonte - Source: http://www.xinhuanet.com/politics/2016-05/06/c_128963979_2.htm)

Figura 10c – Linea Maglev in Changsha, Cina - Applicazione EMS per medio-basse velocità.

Figure 10c – Maglev line in Changsha, China - EMS Low-to-medium speed application.

3.2.3 Esperienze nelle applicazioni EMS

La pratica applicativa mostra che i sistemi EMS presentano elevata sensibilità nei confronti delle caratteristiche costruttive dell'infrastruttura sopraelevata e dei sistemi di controllo. Il basso valore altezza di traferro con cui opera il sistema richiede ridottissime tolleranze di precisione, aumentando di fatto sia i vincoli costruttivi che i costi dell'infrastruttura.

Quando i veicoli attraversano a basse velocità i deviatori (strutturalmente leggeri), le vibrazioni di accoppiamento veicolo-binario risultano particolarmente gravose e possono portare anche al cedimento dell'apparato di sospensione.

Attualmente, per ridurre tale fenomeno vibrazionale si adottano il controllo della struttura ed il rafforzamento del binario per conseguire una frequenza naturale più alta. È inoltre possibile ottimizzare il sistema di controllo delle sospensioni attraverso un'analisi dinamica preventiva che però necessita di essere realizzata prima della costruzione della struttura.

3.3. Levitazione Elettrodinamica (EDS)

Il principio di funzionamento EDS e le sue applicazioni sono di seguito illustrate.

3.3.1 Principio di funzionamento EDS

L'EDS si basa sull'utilizzo di forze repulsive derivanti dall'interazione di un dispositivo magnetico in movimento rispetto ad un conduttore fisso. Il campo magnetico dell'apparato induttore genera delle correnti indotte sul conduttore che, a loro volta, per la legge di Lenz, creano un campo magnetico che si oppone alla variazione del campo



(Fonte - Source: http://www.chinadaily.com.cn/interface/toutiao-new/53004704/2018-11-07/cd_37218624.html)

Figura 10d – Linea Maglev line in Pechino, Cina - Applicazione EMS per medio-basse velocità.

Figure 10d – Maglev line in Beijing, China - EMS Low-to-medium speed application.

When the Maglev vehicles operate on light turnout beam or running at low speed, the vehicle-track coupling vibration is particularly serious. The vehicle-switch coupling vibration is very prominent, which can easily lead to suspension failure.

At present, the main measure to restrain the vehicle-track coupling vibration is to control the rail's structure and strengthen the track structure to make it has a higher natural frequency. It is possible to optimize the suspension control system to improve coupled vibrations by means of a preventive analysis of vehicle-track coupling vibrations, which should be carried out prior to construction of the structure.

3.3. Electro Dynamic Levitation

EDS working principle and its applications are illustrated below.

3.3.1. EDS working principle

The EDS is based on the repulsion forces arising from the interaction of a moving magnetic device with respect to a conductor. The inductor magnetic field generates induced currents on the conductor which, in turn, as per Lenz's law, creates a magnetic field that opposes the variation of the inductor field. The interaction between these two fields produces a repulsive force that increases with speed. But it does not work at standstill, which means the train must move at a critical speed before the induced currents are of sufficient magnitude to suspend it. Consequently, the levitation force decreases with speed until it is cancelled for zero speed values. Therefore, below the critical speed, the train does not levitate and an auxiliary wheel system must be used for operation.

dell'induttore. L'interazione tra questi due campi produce una forza repulsiva che aumenta con la velocità e si azzerà per valori nulli. In termini trasportistici, ciò significa che il treno deve raggiungere una velocità critica prima che le correnti indotte siano sufficientemente elevate da generare forze necessarie a farlo levitare. Pertanto al di sotto della velocità critica, il treno non si solleva dal binario e pertanto deve utilizzare un sistema di ruote ausiliarie. Questo tipo di levitazione è intrinsecamente stabile, non necessita di controllo addizionale e consente di raggiungere un elevato valore di altezza di traferro (circa 100 mm).

La tecnologia EDS, in funzione dei diversi dispositivi utilizzati, può essere ulteriormente classificata come di seguito:

- i) Levitazione elettrodinamica a magneti permanenti: essa si basa sull'interazione tra PMs montati sul veicolo (secondo lo schema di HALBACH) e la piastra conduttrice del binario, così come schematizzato in Fig. 11b (sistema USA Inductrack [29]).
- ii) Levitazione a magneti superconduttori (SCM): essa è basata sull'interazione tra magneti superconduttori, posti a bordo del veicolo, e gli avvolgimenti conduttivi cortocircuitati, distribuiti lungo il binario (versione ad alta velocità) (Fig. 11c).

Nel sistema EDS, la densità di flusso magnetico B nell'aria si muove relativamente alla piastra conduttrice; la corrente indotta può essere calcolata tramite la seguente relazione:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \sigma \times (\vec{v} \times \vec{B}) = \sigma \times \begin{bmatrix} i & j & k \\ v & 0 & 0 \\ B_x & B_y & B_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

Dove $\vec{E}$ è il vettore del campo elettrico, σ è la conduttività e v rappresenta la velocità di spostamento. Una volta che la corrente parassita è indotta nella lastra conduttiva, si genera la forza di Lorentz secondo l'Eq. (4).

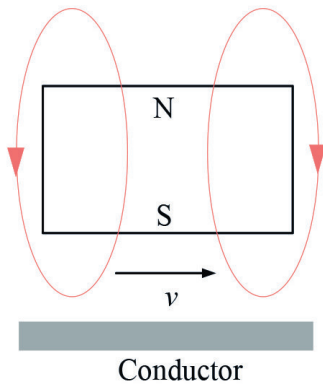


Figura 11a – Principio di funzionamento - Schema EDS.
Figure 11a – Working principle - EDS Scheme.

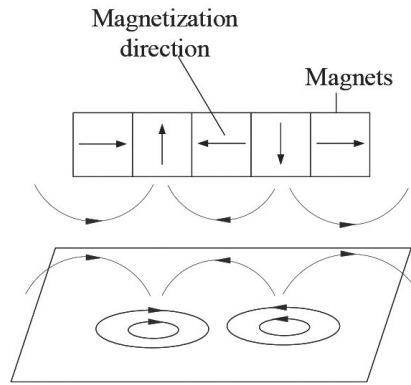


Figura 11b – EDS con PM - Schema EDS.
Figure 11b – EDS with PM - EDS Scheme.

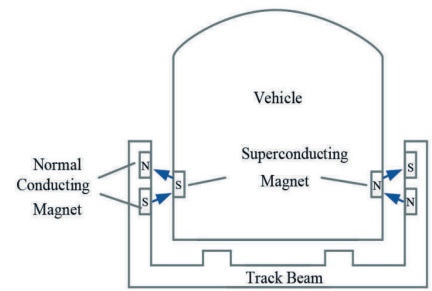


Figura 11c – EDS con SCM - Schema EDS.
Figure 11c – EDS with SCM - EDS Scheme.

Levitation is magnetically stable and the additional control system is not necessary, and the significant air gap (around 100 mm) can be reached.

EDS technology can be categorized into two types:

- i) *Permanent Magnet electrodynamic levitation based on the interaction of PMs (arranged in configurations called Halbach arrays) mounted on the vehicle and a track embedded with conductor plate, as shown in Fig. 11b, such as Inductrack in US [29].*
- ii) *Superconducting magnet (SCM) levitation based on superconducting magnets on board interacting with short-circuited conductive coils on the track for high-speed version in Fig. 11c.*

Magnetic flux density B in air moves relatively to the conducting plate. According to Lenz's law, a magnetic field opposing B will be created by the induced currents in the plate. As the current is created according to Faraday's law.

Magnetic flux density B in air moves relatively to the conducting plate. The induced current is derived as

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \sigma \times (\vec{v} \times \vec{B}) = \sigma \times \begin{bmatrix} i & j & k \\ v & 0 & 0 \\ B_x & B_y & B_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

Where $\vec{E}$ is the electric field vector, σ is the conductivity and v represents the moving velocity. Once eddy current is induced in the conductive sheet, Lorentz force is generated, and it is expressed as Eq. (4).

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ 0 & J_y & J_z \\ B_x & B_y & B_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

Thus, the force equations in EDS are given in Eq. (5).

$$F = J \times B = \begin{bmatrix} i & j & k \\ 0 & J_y & J_z \\ B_x & B_y & B_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

Pertanto, le forze si ricavano dalle relazioni (5).

$$\begin{aligned} F_x &= -\sigma v(B_z \cdot B_z + B_y \cdot B_y) \\ F_y &= \sigma v(B_x \cdot B_y) \\ F_z &= \sigma v(B_x \cdot B_z) \end{aligned} \quad (5)$$

dove F_x è la resistenza magnetica e F_z è la forza di levitazione. Dalle relazioni (5) si evince che, oltre alle le forze di sustentazione e di guida, lungo la direzione del moto si genera una forza F_x con valori negativi che rappresenta la resistenza magnetica al moto che si oppone all'avanzamento del veicolo.

3.3.2. Applicazioni EDS

La ricerca sulla tecnologia dei treni Maglev con magneti superconduttori a bassa temperatura (4 K) [30][31] è iniziata in Giappone nel 1962. Nel 1972 fu realizzato con successo il primo prototipo (ML100). Nel 1975, il veicolo sperimentale (ML500) ha raggiunto una velocità di 517 km/h in assenza di passeggeri a bordo. Il 21 aprile 2015, nella linea di prova di YAMANASHI, il veicolo "L0" ha stabilito, il record mondiale di velocità (603 km/h) con equipaggio a bordo [32] (Fig. 12a).

La tecnologia EDS è utilizzata anche nel sistema Inductrack (Fig. 12b) che è stato sviluppato da un team di scienziati del Lawrence Livermore National Laboratory in California (USA). Tale sistema si basa sulla levitazione magnetica elettrodinamica di tipo passivo in quanto utilizza avvolgimenti passivi distribuiti sul binario e magneti permanenti (disposti nello schema di HALBACH) sul veicolo.

3.3.3. Esperienze sulle applicazioni EDS

Il sistema EDS genera alti valori di resistenza soprattutto a basse velocità.

Per quanto concerne la tecnologia giapponese EDS (LTS), quando il veicolo levita ad un'altezza di 230mm, il valore di picco della resistenza ma-

$$\begin{aligned} F_x &= -\sigma v(B_z \cdot B_z + B_y \cdot B_y) \\ F_y &= \sigma v(B_x \cdot B_y) \\ F_z &= \sigma v(B_x \cdot B_z) \end{aligned} \quad (5)$$

In EDS system, F_x is expressed as the magnetic resistance and F_z is expressed as the levitation force. It can be seen that excepting the levitation force and guidance force, another force along the direction of operation is existent which is a negative. That is the magnetic resistance, obstructing the movement of vehicles.

3.3.2. Application of EDS

Japan's low temperature (4 K) superconducting Maglev train technology [30][31] research began in 1962. And in 1972, ML100 principle vehicle was successfully developed. In 1975, the ML500 type test vehicle was speeded up to 517 km/h without passengers. The "L0" train achieved the world record speed of 603 km/h [32] for manned operation of the Yamanashi Maglev test line in Japan on April 21, 2015, as shown in Fig. 12a.

Inductrack technology was developed by a team of scientists at Lawrence Livermore National Laboratory in California (USA). Inductrack is a passive, fail-safe electrodynamic magnetic levitation system, using only unpowered loops of wire in the track and permanent magnets (arranged into Halbach arrays) on the vehicle to achieve magnetic levitation (Fig. 12 b).



(Fonte - Source: <https://www.maglev.net/worlds-fastest-train-l0-series>)

Figura 12a – Treno L0 ad alta velocità (Giappone) - Applicazione EDS.

Figure 12a – High speed L0 Train (Japan) – EDS Application.



(Fonte - Source:

http://gcep.stanford.edu/pdfs/ChEHeXOTnf3dHH5qjYRXMA/09_Post_10_11_trans.pdf)

Figura 12b – Prototipo Indutrack a medio-basse velocità (US) - Applicazione EDS.

Figure 12b – Low-to-medium medium speed Inductrack train (US) - EDS Application.

gnetica supera di diverse volte la resistenza di rotolamento dei treni WoR.

Questa tecnologia implica: i) elevatissimi campi magnetici concentrati sul veicolo e realizzati tramite magneti superconduttori a bassa temperatura e ii) opportune tecniche di interazioni tra i campi magnetici induttori ed avvolgimenti indotti per realizzare contemporaneamente la sustentazione e la guida.

Gli elevati campi magnetici in gioco, pur se contrastati da schermature, interferiscono comunque con l'ambiente e le persone.

Grazie allo sviluppo della scienza dei materiali, alcuni ricercatori stanno verificando la possibilità di sostituire i magneti superconduttori a bassa temperatura con magneti permanenti.

3.4. Levitazione magnetica in superconduzione (SML)

La tecnologia SML si basa sull'interazione tra una lastra superconduttiva ed un campo magnetico. I superconduttori sono l'unico tipo di materiale, ad oggi conosciuto, che ha una perfetta risposta diamagnetica e resistenza elettrica nulla.

Il fenomeno superconduttivo si manifesta all'interno di un campo definito da tre valori critici quali: temperatura (T_c), corrente (J_c) e campo magnetico (H_c).

Quando un materiale effettua la transizione dallo stato resistivo a quello superconduttivo, espelle attivamente

3.3.3. Experience in EDS application

The magnetic resistance of EDS is very high at low speed. As for the Japanese EDS (LTS), when suspended with a height of 230mm, the peak value of magnetic resistance is several times of WoR trains rolling resistance.

The key technology includes two aspects: i) a strong magnetic field on the vehicle due to the use of low temperature superconducting magnets and ii) the appropriate utilization of the magnetic force interaction between the vehicle's magnets and the induced magnetic field to realize the guidance of the vehicle in the high speed suspension state.

The strong magnetic fields, although counteracted by shielding, still interfere with the environment and people.

Thanks to developments in materials science, some researchers are investigating the possibility of replacing low-temperature superconducting magnets with permanent magnets.

3.4. Superconducting magnetic levitation (SML)

The SML approach is based on the interaction between a superconducting plate and a magnetic field. Superconductors are the only type of material known today which has a perfect diamagnetic response and zero electrical resistance.

The superconductive phenomenon occurs within a field defined by three critical values: temperature (T_c), current (J_c) and magnetic field (H_c).

When a material makes the transition from the normal to superconducting state, it actively excludes magnetic fields from its interior. This is called "Meissner" effect, a property of all superconductors, that was discovered by the German physicists W. MEISSNER and R. OCHSENFELD in 1933. In other terms the core of a superconductor cannot be penetrated by an applied magnetic field.

When the applied (external) magnetic field exceeds the critical one $H_{c,}$, the superconductivity breaks down. Superconductors can be divided into two types depending on how this breakdown occurs:

- *in type I superconductors, superconductivity is abruptly destroyed through an immediate phase transition when the applied field strength rises above a critical value H_c ;*
- *type II superconductors have two critical magnetic fields: lower and upper. The lower critical field occurs when magnetic flux vortices penetrate the material, but*

i campi magnetici dal proprio interno. Questo fenomeno, chiamato effetto “Meissner”, è una proprietà di tutti i superconduttori che fu scoperta dai fisici tedeschi W. MEISSNER e R. OCHSENFELD nel 1933. In altri termini, il nucleo di un superconduttore non può essere penetrato da un campo magnetico applicato esternamente.

Se però il campo magnetico applicato supera il valore critico H_c , la superconduttività si “distrugge”; a seconda di come avviene questa “distruzione”, i superconduttori possono essere così classificati:

- superconduttori del I° tipo in cui la superconduttività viene bruscamente “distrutta” attraverso una transizione immediata di fase quando l'intensità del campo applicato supera il valore critico H_c ;
- superconduttori del II° tipo che presentano due valori di H_c di cui uno inferiore e l'altro superiore. Il campo critico inferiore si ha quando i vortici di flusso magnetico penetrano nel materiale e lo stesso rimane in uno stato superconduttivo. Invece, il campo critico superiore si ha quando la densità dei vortici diventa troppo grande ed il materiale perde la superconduttività.

Allo stato attuale delle conoscenze del fenomeno della superconduttività, i superconduttori possono anche essere classificati in relazione alla temperatura critica di transizione, così come di seguito:

- superconduttori a bassa temperatura (LTS), generalmente raffreddati con elio liquido (4K);
- superconduttori ad alta temperatura (HTS), generalmente raffreddati con azoto liquido (77K).

3.4.1. Principio di funzionamento SML

Per quanto sopra descritto, quando un superconduttore interagisce con un campo magnetico, questo viene respinto (effetto Meissner) e si genera una forza repulsiva reciproca.

Tale principio può essere utilizzato per realizzare architetture di treni Maglev in cui i superconduttori, posti a bordo, interagiscono con i campi magnetici del binario per generare le forze di sostentazione e di guida del veicolo.

3.4.1.1. SML a bassa temperatura

L'idea di utilizzare l'effetto Meissner con superconduttori a bassa temperatura per applicazioni di treni Maglev, fu proposta per la prima volta nel 1973 da G. LANZARA [33] che conseguì un brevetto statunitense nel 1990 [34] i cui schemi di base sono illustrati nella Fig. 13.

L'architettura ideata si basa sull'interazione tra lastre superconduttrici “riflettenti”, poste a bordo del veicolo, ed il campo magnetico della guida. I principali vantaggi riguardano:

- l'assenza della resistenza magnetica al moto del veicolo poiché le correnti parassite sono generate all'interno di un superconduttore con resistenza elettrica nulla;
- la possibilità di conseguire notevoli valori di altezza operativa (traferro), anche superiori a 50 mm, tra il

the material remains in a superconductive state. When the density of the vortices becomes too great, the entire material loses superconductivity, and this corresponds to the upper critical field.

In the current state of knowledge about the superconducting phenomenon, the superconductors can also be classified according to the critical transition temperature as follows:

- *low-temperature superconductors (LTS), is generally cooled with liquid helium (4K);*
- *high temperature superconductors (HTS), is generally cooled with liquid nitrogen (77K).*

3.4.1. SML working principle

For above, when a superconductor interacts with a magnetic field, this is repelled (Meissner effect) and a reciprocal repulsive force is generated.

This principle can be used to realize a maglev train architecture in which superconductors, placed on board the vehicle, interact with magnetic fields on the guideway to achieve the levitation and guidance forces of the vehicle itself.

3.4.1.1. Low temperature SML

The idea of using the Meissner effect with low temperature superconductors for magnetic levitation train applications was first proposed in 1973 by G. LANZARA [33] who was granted a U.S. patent in 1990 [34] whose basic concepts are illustrated in Fig. 13.

The main advantages derived from the proposed architecture based on magnetically levitated vehicle with superconducting mirror sheets interacting with guideway magnetic field are:

- *no resistances to the vehicle motion because eddy-currents are generated inside a superconductor with zero electrical resistance;*
- *significant operating gaps, even greater than 50 mm, can be obtained between the vehicle and the guideway, depending on the intensity of the magnetic fields;*
- *no active control system is needed to obtain the set operating gaps;*
- *use of static magnetic fields generated by super magnets;*
- *use, where economically acceptable, of variable magnetic fields on the guideway so that propulsive and braking forces are also achieved;*
- *no energy is needed to achieve levitation if static magnetic fields are used.*

The basic low temperature SML physical principles are outlined above, with the exception of the type of superconductor, the critical transition temperature and inherent forces stability, are also valid for the high temperature SML method described in the following sub-section.

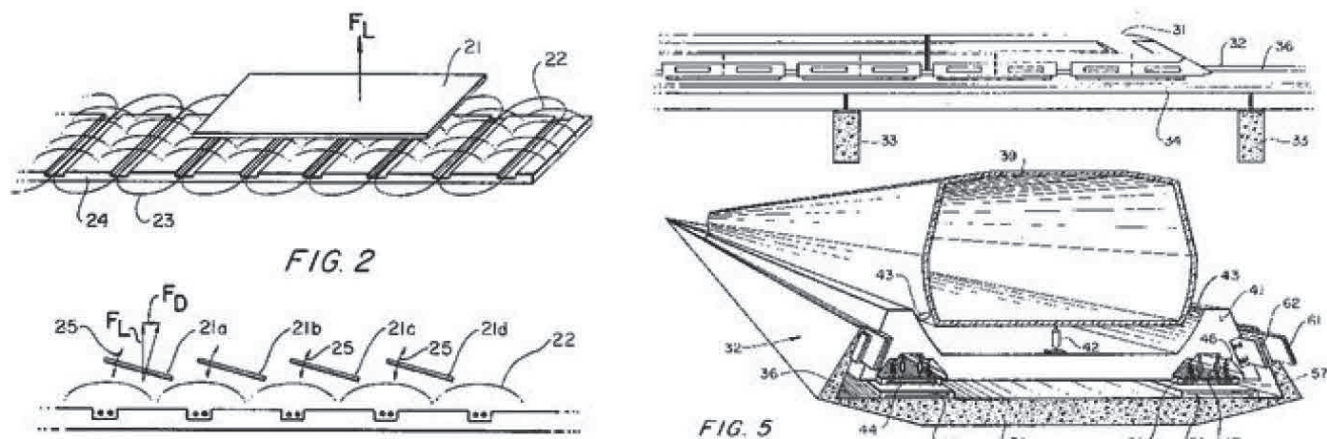


Figura 13 – Schemi di veicolo Maglev con lastre riflettenti in superconduzione interagenti con il campo magnetico della guida (G. LANZARA, [34]).

Figure 13 – Schemes of Maglev vehicle with superconducting mirror sheets interacting with guideway magnetic field (G. LANZARA, [34]).

veicolo e la guida, a seconda dell'intensità dei campi magnetici utilizzati;

- l'assenza di sistemi di controllo attivo per mantenere le distanze operative (gap) impostate;
- l'utilizzo di campi magnetici statici generati da super magneti;
- l'uso, dove economicamente conveniente, di campi magnetici variabili sulla guidavia in modo da ottenere anche forze propulsive e frenanti;
- non è richiesta energia elettrica ai fini della levitazione qualora si utilizzino campi magnetici statici.

I principi fisici di base della tecnologia SML a bassa temperatura, con l'eccezione del tipo di superconduttore, valore di temperatura critica di transizione e stabilità del campo di forze, sono validi anche per il metodo SML ad alta temperatura di seguito descritto.

3.4.1.2 SML ad alta temperatura

La tecnologia SML ad alta temperatura (HT) si basa sull'interazione tra un superconduttore ad alta temperatura (HTS), appartenente a quelli non ideali del II° tipo, ed un campo magnetico statico generato dai magneti permanenti (Fig. 14a). L'interazione tra HTS e campo magnetico produce forze repulsive e attrattive, poiché il campo magnetico rimane parzialmente "intrappolato" all'interno del materiale superconduttore (effetto *flux pinning*). A tal fine, la transizione del materiale allo stato superconduttore deve avvenire in presenza di un campo magnetico applicato.

L'effetto *flux pinning* nei materiali HTS genera sia forze repulsive che attrattive la cui combinazione determina una sospensione stabile senza l'ausilio di un apparato di controllo attivo.

In altre parole, rispetto alla posizione di equilibrio, si ottiene il doppio effetto: si generano forze repulsive se il

3.4.1.2. High temperature SML

The high temperature SML levitation method is based on the interaction between high temperature superconductor (HTS) of non-ideal type II superconductors, and a static magnetic field generated by PMs (Fig. 14a). The interaction between HTS and static magnetic field produces repulsive and attractive forces as the magnetic field remains partially "trapped" inside the superconducting material (flux pinning effect). For this purpose, the transition of the material to the superconducting state must occur in the presence of an external magnetic field.

Operation is based on the flux pinning effect of superconducting materials that generates both repulsive and attractive forces, and this combination of forces determines stable suspension without the need for active control.

In other words, with respect to the equilibrium position, the double effect is obtained: repulsive forces are generated if the superconductor and the magnets are close to each other and attractive forces if they move away.

The levitation height of 10-30 mm can be reached (Fig. 14b).

The levitation method has been enhanced starting at the end of the 1980s with the advent of two sintered materials such as high temperature critical superconductors $YBa_2Cu_3O_x$ (YBCO) and high performance $Nd_2Fe_{14}B$ (Nd-FeB) permanent magnets.

In the SML system, the superconductors are cooled with liquid nitrogen (77 K) instead of the less efficient liquid helium (4 K) that is used in the EDS system. All with significant advantages in both simplicities of cryogenic systems and economics.

In a two-dimensional model configuration, levitation force (F_z) and and guidance force (F_x) can be calculated by Equations (6) and (7), respectively:

superconduttore e i magneti permanenti si avvicinano tra loro e, viceversa, forze attrattive se si allontanano.

Questo metodo consente di ottenere altezze di traferro di 10-30 mm (Fig. 14b).

La tecnologia SML è stata sviluppata alla fine degli anni 1980 grazie alla scoperta di due materiali sinterizzati quali: i superconduttori $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (YBCO) ad alta temperatura critica ed i magneti permanenti $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (NdFeB) ad alte prestazioni di campo.

I superconduttori sono raffreddati con azoto liquido (77 K) al posto del meno efficiente elio liquido (4 K) che invece è utilizzato nella tecnologia EDS; il tutto con significativi vantaggi sia di semplicità dei sistemi criogenici che di riduzione dei costi.

Con riferimento ad un modello bidimensionale, la forza di sustentazione (F_z) e la forza di guida (F_x) possono essere calcolate rispettivamente dalle equazioni (6) e (7):

$$F_z = \int J \times B_x dS \quad (6)$$

$$F_x = \int J \times B_z dS \quad (7)$$

dove B_x e B_z sono le componenti della densità di flusso magnetico rispettivamente nelle direzioni orizzontale e verticale, J è la corrente elettrica nei superconduttori e S è l'area dei superconduttori.

3.4.2. SML ad alta temperatura: ricerca e sviluppo

La tecnologia SML ad alta temperatura (HT), grazie alle intrinseche caratteristiche (sospensione auto-stabilizzante, assenza di resistenza magnetica al moto, basso consumo energetico, semplicità della struttura ed eco-compatibilità), è alla base di sistemi di trasporto prototipi.

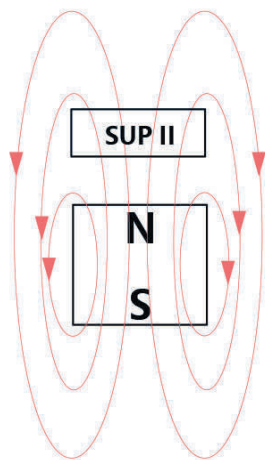


Figura 14a – Principio di funzionamento - Schema HT SML.

Figure 14a – Working principle - HTSML scheme.

$$F_z = \int J \times B_x dS \quad (6)$$

$$F_x = \int J \times B_z dS \quad (7)$$

where B_x and B_z refer to the component of magnetic flux density in the horizontal direction and vertical direction, respectively. And J is the electric current in superconductors and S is the total area of superconductors.

3.4.2. High temperature SML: research and development

Due to its inherent characteristics (self-stabilizing, magnetic drag free, low-energy consumption, simple structure and eco-friendliness), the HT SML technology has caught the attention of several research institutes for the development of prototype systems.

By neglecting minor demonstrations, Fig. 15 illustrates, in the international framework, research groups that have developed prototype SML systems such as those, Century in Chengdu (China) [35], SupraTrans in Dresden (Germany) [36], UAQ4 in L'Aquila (Italy) [37], Cobra in Rio de Janeiro Brazil [38], AIST in Tokyo (Japan) [39] and Russian vehicle (Russia) [40].

The high-temperature SML technological approach, although still at an experimental stage, has the potential to overcome the operational limitations due to magnetic resistance to motion that characterize the other technologies. Therefore, it is believed that HT SLM technology can contribute to meeting the needs of the future generation of Maglev transport systems.

3.4.2.1 Italian experiences

Italian research activities in the field of innovative transportation systems started in the early 70's at the University of Palermo, with the construction of the IAP2 and IAP3 air cushion trains (Fig. 3b and 3c of Section 2), of

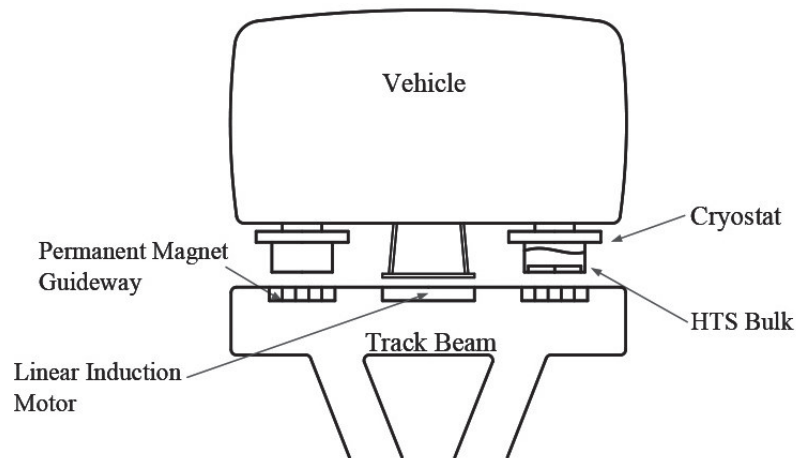


Figura 14b – Applicazione - Schema HT SML.

Figure 14b – Application - HTSML scheme.

pali sviluppati da diversi gruppi di ricerca. Trascurando le dimostrazioni minori, la Fig. 15 illustra l'ubicazione internazionale degli istituti di ricerca impegnati nello sviluppo dei seguenti prototipi: Century in Chengdu (Cina) [35], SupraTrans in Dresda (Germania) [36], UAQ4 in L'Aquila (Italia) [37], Cobra in Rio de Janeiro Brasile [38], AIST in Tokyo (Giappone) [39] ed il Veicolo russo (Russia) [40].

L'approccio tecnologico SML ad alta temperatura, pur essendo ancora in fase sperimentale, consente potenzialmente di superare i limiti operativi dovuti alla resistenza magnetica al moto che caratterizzano le altre tecnologie. Si ritiene pertanto che la tecnologia HT SLM possa contribuire a soddisfare le esigenze della futura generazione dei sistemi di trasporto Maglev.

3.4.2.1. Esperienze italiane

L'attività di ricerca italiana nel campo dei sistemi di trasporto innovativi è iniziata nei primi anni '70 presso l'Università di Palermo, con la costruzione dei treni a cuscino d'aria IAP2 e IAP3 (Fig. 3b e Fig. 3c del paragrafo 2). Nonostante la validazione delle diverse innovazioni di sistema, lo sviluppo del progetto fu interrotto per i noti limiti tecnologici e pertanto le attività di ricerca furono orientate verso la tecnologia Maglev, come già illustrato nel paragrafo 3.4.1.1.

which the second was tested on the test line in the Trapani airport area (Sicily). Despite the validation of the various system innovations, and the project development was interrupted for technological limits.

Therefore, research activities were oriented towards Maglev technology, as illustrated in subsection 3.4.1.1 Following the advent of HTS materials, research continued at the University of L'Aquila, under the leadership of G. LANZARA with the project of the UAQ4 maglev train based on HT SML technology [41][42].

To this purpose, a laboratory was set up where various experimental devices with a circular geometry were designed and built to reproduce and test the phenomenon of magnetic interaction in a wide range of parameters as well as calibrating the specifically developed numerical models.

All this made it possible to identify the system configuration capable of optimising the relationship between lifting and guiding forces and of eliminating magnetic resistance to motion [43][44][45][46][47][48][49][50][51].

In parallel, studies and tests on the propulsion system have also been carried out [52][53].

In addition, an innovative experimental Maglev linear system (Fig. 16a), with patented levitation [54] and propul-



Figura 15 – Ubicazione degli istituti di ricerca HTS Maglev in ambito internazionale.

Figure 15 – Distribution of HTS maglev research institutes around the world.

A seguito dell'avvento dei materiali superconduttori ad alta temperatura critica, la ricerca continuò all'Università dell'Aquila, sotto la guida di G. LANZARA con la realizzazione del progetto del treno Maglev UAQ4 a tecnologia HT SML [41][42].

A questo fine è stato allestito un laboratorio dove sono stati progettati e costruiti diversi dispositivi sperimentali a geometria circolare per riprodurre e testare ad ampio spettro il fenomeno d'interazione magnetica al variare dei parametri in gioco e per calibrare i modelli numerici appositamente sviluppati.

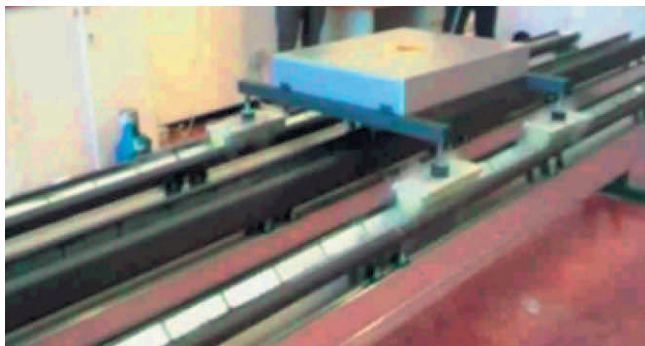
Il tutto ha consentito di individuare la configurazione di sistema in grado di ottimizzare il rapporto tra forze di sostentazione e guida e di eliminare la resistenza magnetica al moto [43][44][45][46][47][48][49][50][51].

In parallelo, sono stati effettuati studi e test per definire l'apparato di propulsione più idoneo [52][53].

Inoltre un innovativo sistema sperimentale Maglev (Fig. 16a) a guidovia lineare, con apparati di levitazione [54] e propulsione [55] brevettati, è stato costruito e testato al fine di dimostrare la fattibilità tecnologica per:

- i) realizzare un apparato Maglev di sostentazione e guida nelle tre direzioni dello spazio e in tutte le fasi del moto, anche a velocità nulla, senza apporto di energia elettrica;
- ii) eliminare la resistenza magnetica al moto;
- iii) realizzare un innovativo sistema di propulsione/frenatura ad alta efficienza per applicazioni sia a bassa che alta velocità (Fig. 16b);
- iv) progettare un veicolo leggero con tecnologie, materiali, dimensioni e livello di comfort mutuati dal sistema aeronautico (Fig. 16c).

Il veicolo del sistema UAQ4 è sospeso e guidato silenziosamente per mezzo di un modulo di levitazione magnetica, unico del suo genere a forma di "V" (o "L"), che permette di scomporre la forza magnetica in una componente verticale (sostentazione) ed una orizzontale (guida) con va-



(Fonte - Source: Autori – Authors)

Figura 16a – Sistema sperimentale - Sistema Maglev italiano UAQ4.

Figure 16a – Laboratory system - Italian UAQ4 Maglev system.

sion [55] apparatuses, was built and successfully tested in order to demonstrate the feasibility to:

- i) realize a levitation system to lift and guide the vehicle three-dimensionally self-stabilizing in all phases of motion, zero speed included, without electricity input;
- ii) reduce the magnetic resistance to the vehicle motion almost to zero;
- iii) realize an innovative high efficiency propulsion/brake system for low and high speed applications (Fig. 16b);
- iv) designing a lightweight vehicle with technologies, materials, dimensions and comfort level derived from the aeronautical system (Fig.16c).

The UAQ4 vehicle is suspended and guided silently by a unique V-shaped (or L-shaped) magnetic levitation module, which enables the magnetic force to be broken down into a vertical component (lifting) and a horizontal component (guidance) with values suitable for high-speed applications too. The phenomenology associated with three-dimensional self-stabilization of the suspension device has been extensively researched and tested [56][57].

In addition, the dynamic vehicle-track coupling has been studied both in straight and curved motion [58][59][60][61][62].

The vehicle's propulsion and braking are provided by an innovative DC linear stepper motor with permanent magnets [63].

The full scale high-speed version train was designed by using immersive virtual reality (Fig. 16b).

3.4.2.2. Chinese experiences

Concerning China research activities, in 2000, the first manned HTS Maglev test vehicle "Century" (Fig. 17a) was developed successfully at Southwest Jiaotong University (SWJTU), Chengdu. Its maximum load capacity is 530 kg with the levitation height of 20 mm and a working time of dewars is 6 hours [64].

A ring test line of HTS Maglev (Fig. 17b) and a Super-



(Fonte - Source: Autori – Authors)

Figura 16b – Rappresentazione degli apparati di sospensione e propulsione - Sistema Maglev italiano UAQ4.

Figure 16b – Suspension and propulsion devices representation - Italian UAQ4 Maglev system.

lori idonei anche per applicazioni ad alta velocità.

La fenomenologia connessa all'auto-stabilizzazione tridimensionale del dispositivo di sospensione è stata ampiamente approfondita e sperimentata [56][57].

Inoltre, la dinamica dell'accoppiamento veicolo-guidovia è stata studiata sia in condizioni di moto rettilineo che curvilineo [58][59][60][61][62].

La propulsione e la frenatura del veicolo sono assicurate da innovativo motore lineare DC di tipo stepper a magneti permanenti [63].

La progettazione a scala reale del treno, nella versione ad alta velocità, è stata sviluppata tramite tecnica in realtà virtuale immersiva (Fig. 16b).

3.4.2.2. Esperienze Cinesi

Per quanto riguarda la Cina, le attività di ricerca nel campo HTS Maglev sono iniziate nel 2000 con la costruzione del primo veicolo di prova "Century", in grado di trasportare persone a bordo (Fig. 17a), presso la Southwest Jiaotong University (SWJTU), Chengdu. Il sistema ha una capacità di carico massima di 530 kg in corrispondenza di un'altezza di traferro di circa 20 mm ed un'autonomia operativa dell'apparato criogenico di circa 6 ore [64].

Nel 2013 sono stati costruiti sia un nuovo veicolo denominato Super-Maglev I (Fig. 17b) sia una linea di pro-



(Fonte - Source: Autori – Authors)

Figura 16c – Modello (scala 1:20): della versione ad alta velocità - Sistema Maglev italiano UAQ4.

Figure 16c – High speed version model (scale 1:20) - Italian UAQ4 Maglev system.

Maglev I vehicle (Fig. 17c) were developed in 2013. The length of the guideway is 45 m, including two 3.6 m straight lines and two 6 m radius curve-lines [65]. After that, Super-Maglev-II was developed on the basis of Super-Maglev I [66].

In 2021, an engineering prototype of high-speed HTS maglev (Fig. 18) was successfully developed. The car body is made of carbon fiber composite material with 21 m in length and 3.2 m in width. The load capacity is over 15 t. It is propelled by long stator centrally mounted single-side permanent magnet synchronous linear motor and its braking mode adopts electromechanical braking and eddy current braking.

As vehicle dynamics play a key role in the development of high-speed Maglev systems, finite element analyses were carried out to better identify the relationships among magnetic induction, internal current density and levitation forces in HTS bulks [67][68].

In order to study the motion law of HTS bulk under the action of external magnetic field, mathematical models of levitation force and guidance force were proposed [69][70]. Based on these models, nonlinear vibration characteristics of HTS bulk in the field of permanent magnetic Halbach array was systematically investigated [71][72].

And recently, the Vehicle/Bridge Coupled dynamics were widely investigated [73][74]. For the engineering application, some other studies have been carried out. E.g., the PMG was optimized to enhance the levitation force [75]. Electromagnetic Turnout was designed to make the vehicle realize turn [76] and PML mode was introduced [77][78].

These studies indicate that HTS maglev has potential of being under high-speed operation. Consider being com-



(Fonte - Source: <http://news.sina.com.cn/c/2003-12-31/10092511939.shtml>)

Figura 17a – Il primo veicolo "Century" HTS con persone a bordo - Sistema HTS Maglev Cinese.

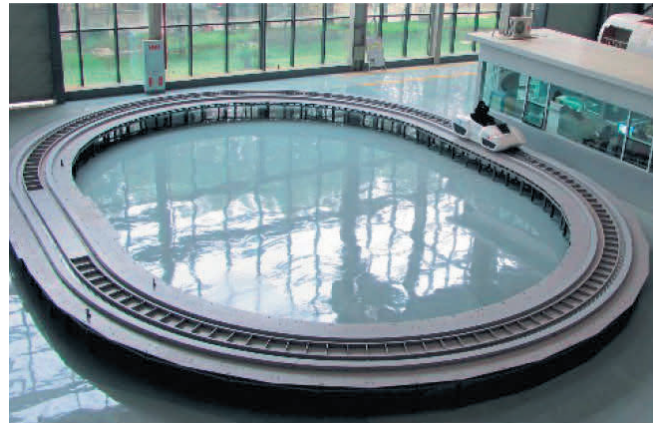
Figure 17a – Laboratory system - Italian UAQ4 Maglev system.



(Fonte - Source: Autori – Authors)

Figura 17b – Super-Maglev I - Sistema HTS Maglev Cinese.

Figure 17b – High speed version model (scale 1:20) - Italian UAQ4 Maglev system.



(Fonte - Source: Autori – Authors)

Figura 17c – Circuito di prova [53] - Sistema HTS Maglev Cinese.

Figure 17c – Suspension and propulsion devices representation - Italian UAQ4 Maglev system.

va circolare (Fig. 17c) lunga 45 m, con due rettilinei (di 3,6 m) e due curve (con raggio di 6 m) [65]. Successivamente, sulla base dell'esperienza maturata, è stato sviluppato il veicolo Super-Maglev-II [66].

Nel 2021 è stato sviluppato, a scala reale, il prototipo ad alta velocità HTS Maglev con capacità di carico superiore a 15 t (Fig. 18). La scocca portante del veicolo (lungo 21 m e largo 3,2 m) è realizzata in materiale composito in fibra di carbonio. Il sistema utilizza un motore lineare sincrono ad un solo lato (a statore lungo e magneti permanenti) con modalità di frenatura sia elettromeccanica che a correnti parassite.

Poiché la dinamica del veicolo assume un ruolo chiave per lo sviluppo dei sistemi Maglev ad alta velocità, sono state condotte analisi agli elementi finiti per meglio individuare le relazioni tra induzione magnetica, densità di corrente interna e forze di levitazione nei materiali HTS [67][68]. Inoltre, al fine di studiare la dinamica del sistema HTS sotto l'azione del campo magnetico esterno, sono stati definiti appositi modelli matematici idonei a computare le forze di sustentazione e di guida [69][70]. Sulla base di questi modelli, sono state studiate sistematicamente le caratteristiche non lineari di vibrazione degli apparati HTS interagenti con magneti permanenti distribuiti secondo lo schema di Halbach [71][72].

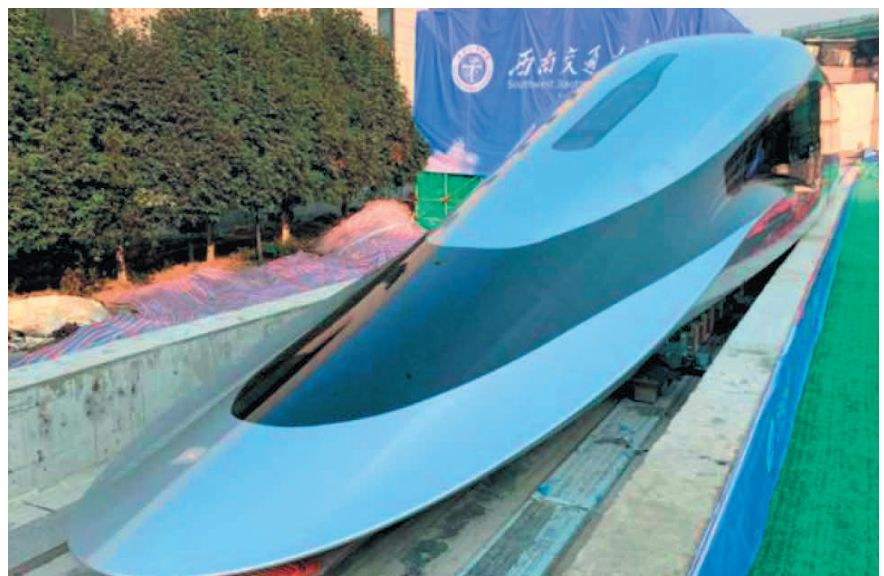
Si è proceduto quindi ad analizzare approfonditamente l'accoppiamento dinamico veicolo/struttura soprelevata [73][74]. Per le applicazioni in-

bined with vacuum pipeline, it is expected to be able to achieve ultra-high-speed operation.

4. Advantages and limits of current Maglev systems

The competitiveness of Maglev systems compared to traditional WoR systems depends on a combination of several factors including technical, performance, environmental and economic ones [79].

In order to proceed with this assessment, it is necessary to analyse both the advantages and limitations of current



(Fonte - Source: Autori – Authors)

Figura 18 – Il nuovo prototipo Maglev HTS ad alta velocità.
Figure 18 – The new high-speed engineering prototype of HTS Maglev.

gegneristiche sono stati condotti ulteriori studi sulla configurazione dei magneti permanenti della guidovia (PMG) per ottimizzare la forza di levitazione [75]. È stato inoltre progettato un deviatore elettromagnetico a tecnologia PML [76] per l'instradamento del veicolo [77][78].

I risultati degli studi indicano chiaramente che la tecnologia Maglev in superconduzione ad alta temperatura è idonea per applicazioni trasportistiche anche ad alta velocità. Nella prospettiva futura di considerarne l'uso congiunto del sistema intubato, ci si aspetta che tale tecnologia possa essere anche utilizzata per applicazioni ad altissima velocità.

4. Vantaggi e limiti degli attuali sistemi Maglev

La concorrenzialità dei sistemi Maglev rispetto a quelli tradizionali WoR dipende dalla combinazione di diversi fattori tra cui quelli tecnici, prestazionali, ambientali ed economici [79].

Per procedere in questa valutazione, occorre analizzare sia i vantaggi che i limiti dell'attuale tecnologia Maglev con l'intento di focalizzare l'attenzione su ulteriori esigenze di ricerca.

A tal proposito, la Tab. 2 illustra sinteticamente il confronto delle prestazioni dei sistemi Maglev e WoR così come proposto da HYUNG-WOO LEE *et al.* [80].

Allo stesso tempo, occorre però sottolineare che le attuali tecnologie EMS e EDS, ormai mature ed affidabili, non consentono ancora di cogliere tutti i potenziali vantaggi connessi alla levitazione magnetica, in quanto ad esempio:

- i dispositivi EMS di levitazione e guida da un lato consumano energia (circa 2 kW/t) [81] per il loro funzionamento e dall'altro generano significative resistenze magnetiche al moto la cui entità varia con la velocità;
- i dispositivi EDS, soprattutto a bassa velocità, generano elevate resistenze magnetiche al moto [82].

Con riferimento ai sistemi Maglev Transrapid (EMS) e MLX01 (EDS), la Fig. 19 illustra l'andamento delle resistenze magnetiche in funzione della velocità, così come riportato nello studio di STEPHAN e LASCHER [83].

Da quanto sopra si deduce che l'insorgere delle resistenze magnetiche durante il moto del veicolo rappresenta una chiara limitazione prestazionale degli attuali sistemi Maglev in quanto esse giocano un ruolo fondamentale non solo dal punto di

Maglev technology with the intention of focusing on further research needs.

In this regard, Tab. 2 briefly illustrates the performance comparison of Maglev and WoR systems as proposed by HYUNG-WOO LEE *et al.* [80].

At the same time, however, it must be stressed that the current EMS and EDS technologies, which are now mature and reliable, do not yet allow to capture all the potential benefits associated with magnetic levitation, since for example:

- EMS levitation and guidance devices on the one hand consume energy (about 2 kW/t) [81] for their operation and on the other hand generate significant magnetic resistance to motion whose magnitude depends on the speed;
- EDS devices, especially at low speed, generate very high magnetic resistances to motion [82].

Fig. 19 shows the magnetic resistance vs speed for EMS Transrapid and EDS MLX01 maglev trains, as well as reported in STEPHAN and LASCHER study [83].

From the above it can be deduced that the occurrence of magnetic resistance during vehicle motion represents a clear performance limitation of current Maglev systems as it plays a fundamental role not only from a technical point of view but above all from an economic and environmental one.

Tabella 2 – Table 2
Confronto delle prestazioni dei sistemi Maglev e WoR
Performance comparison of Maglev and WoR systems

	Sistema Maglev Maglev system	Sistema tradizionale WoR WoR system
Vibrazioni & rumore Vibration & noise	Assenza di contatto meccanico 60-65[dB] No mechanical contact 60-65[dB]	Contatto tra ruote e rotaie 70-75[dB] Contact between wheels and rails 70-75[dB]
Sicurezza Safety	Impossibilità di deragliamento No possibility of derailment	Deragliamento da difetti Derails from a minor defect
Infrastruttura Guideway	Veicolo leggero & carichi distribuiti → struttura di tipo leggero Light vehicle & distributed load → lightweight	Veicolo pesante & carichi concentrati → struttura di tipo pesante Heavy & concentrated load → Hardly structure
Manutenzione Maintenance	Ridotta Very little	Sostituzione periodica di ruote, cuscinetti, rotaie, etc. Periodic replacement of wheels, gear, rail, etc.
Pendenza Grade	circa 80-100/1000 About 80-100/1000	circa 30-50/1000 About 30-50/1000
Curve Curve	30 [m] di raggio In 30 [m] in radius	150 [m] di raggio In 150 [m] in radius

vista tecnico ma soprattutto economico ed ambientale.

Infatti, come emerge dallo studio di E. FRITZ *et al.* [84], rispetto al sistema di trasporto tradizionale WoR, gli attuali sistemi Maglev risultano vantaggiosi in termini di consumo energetico soprattutto nelle applicazioni ad alta velocità (superiori a 300 km/h).

Riteniamo pertanto che sia importante approfondire e sviluppare nuove tecnologie, quale ad esempio quella SML, affinché si possano superare le inefficienze residuali che caratterizzano il funzionamento degli attuali sistemi Maglev.

5. Sistema di Trasporto Maglev ultraveloce con tubo depressurizzato (EET)

Come è noto, la marcia di un treno, a causa dell'interazione con l'ambiente, richiede la combinazione di due requisiti di potenza per superare:

- i) la resistenza al rotolamento che caratterizza il sistema delle ruote;
- ii) la resistenza aerodinamica. I dati sperimentali mostrano che essa rappresenta più dell'80% della resistenza totale quando la velocità del treno supera i 400 km/h [85] e può superare il 90% in galleria [86].

Risulta pertanto fondamentale concepire e sviluppare sistemi di trasporto in grado di eliminare entrambe le resistenze.

Se da una parte la tecnologia Maglev consente di eliminare la resistenza al rotolamento, dall'altra occorre superare i problemi tecnici associati alla barriera di resistenza all'aria prodotta a velocità molto elevate.

Per quanto concerne la riduzione della resistenza aerodinamica, oltre ad ottimizzare la forma del veicolo, poco altro può essere fatto per la componente dell'attrito viscoso quando si opera in "aria" cioè in condizioni di pressione atmosferica prossime al suolo. Nei veicoli terrestri che si muovono in "aria" a velocità molto elevate (più di 600 km/h), si innescano fenomeni di surriscaldamento che possono portare alla distruzione della struttura del veicolo stesso.

Un'alternativa tecnica a tale problematica è quella di far viaggiare i veicoli all'interno di un tubo ovvero una struttura chiusa parzialmente depressurizzata e di ottimizzare, nel contempo, la forma dei veicoli stessi. Con questi presupposti il treno, teoricamente, può raggiungere velocità subsoniche ed ultrasoniche [87].

In termini puramente teorici, le resistenze al moto tenderebbero ad annullarsi qualora un treno Maglev viag-

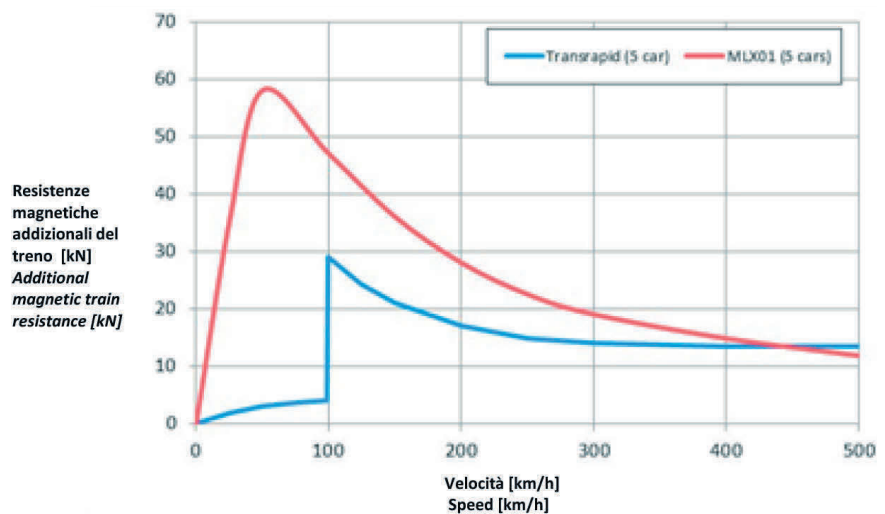


Figura 19 – Resistenze magnetiche al variare della velocità per i sistemi Maglev Transrapid (EMS) e MLX01 (EDS) (STEPHAN and LASCHER [83]).
Figure 19 – Magnetic train resistance for EMS Transrapid and EDS MLX01 maglev systems (STEPHAN and LASCHER [83]).

In fact, as it emerges from the study by E. FRITZ et al. [84], compared to the traditional WoR transport system, the currently operational Maglev systems are advantageous in terms of energy consumption especially in high-speed applications (above 300 km/h).

We therefore believe that it is important to investigate and develop new technologies, such as SML, in order to overcome the residual inefficiencies that characterize the operation of current Maglev systems.

5. Ultra-high-speed Maglev evacuated tube transportation (ETT)

As is well known, vehicle travel, due to interaction with the environment, requires the combination of two power requirements to overcome:

- i) the rolling friction resistance characterizing wheel system;*
- ii) the aerodynamic drag. Experimental data shows that this drag accounts for more than 80% of total drag when the train speed exceeds 400 km/h [85]. Aerodynamic drag can exceed 90% of the total drag for high-speed trains traveling in tunnels [86].*

It is therefore essential to design and develop transport systems that can eliminate both resistances.

Although Maglev technologies allow the rolling resistance to be avoided, the technical problems associated with the air resistance barrier produced at very high speeds must be considered.

For air drag issue, besides changing the shape of the vehicle, little else can be done to reduce viscous friction component when operating under air pressure conditions at a

giasse all'interno di un tubo depressurizzato in condizioni ambientali prossime al vuoto assoluto. Tali condizioni però rimangono ideali e pertanto esse definiscono i limiti fisici estremi della problematica.

Ovviamente in termini pratici, quanto sopra esposto è molto difficile e complicato da realizzare in quanto la corsa di un treno ultraveloce all'interno di un ambiente intubato causa gravi problemi aerodinamici (onde di pressione, vibrazioni sonore, rumore, etc.) che aumentano rapidamente con la sesta-ottava potenza della velocità [88].

5.1. Progressi nella ricerca

Storicamente, nel 1904, R. GODARD, il padre del razzo moderno, ha avanzato l'idea del "trasporto a tubo evacuato" [89].

Un contributo significativo di conoscenza su questo argomento è stato apportato sin dal 1947 dal Prof. FOA che ha guidato il progetto statunitense, denominato *Tube-flight*, incentrato sullo sviluppo di un nuovo sistema di trasporto terrestre intubato ad alta velocità. Esso prevedeva l'utilizzo di un veicolo, a forma di fusoliera d'aereo, sostenuto da dispositivi a cuscino d'aria e propulso da uno dei diversi possibili dispositivi di induzione di flusso, all'interno di un tubo [90][91]. Una sintesi di queste importanti attività di ricerca, unitamente alla Fig. 20, sono riportate nell'articolo di W.B. BROWER [92].

Tuttavia, a causa delle barriere tecnologiche, questa idea è rimasta tale per diversi decenni. Successivamente su questa tematica, grazie anche al progressivo sviluppo dei sistemi Maglev, sono stati realizzati diversi progetti tra i quali: i) *Swissmetro* a velocità ipersonica [93], ii) ET3 brevettato da OSTER (1999) con l'utilizzo di una serie di tubi (con diametro di 1,5 m) depressurizzati a circa 0,1 Pa [94], iii) *Hyperloop* (2013) con un veicolo (noto come *Pod*) che viaggia in ambiente intubato depressurizzato a circa 100 Pa [95].

I risultati di studi teorici evidenziano che veicoli Maglev intubati in ambiente depressurizzato (1% di pressione atmosferica a livello del mare) possono potenzialmente raggiungere un'efficienza maggiore rispetto a quella dell'aereo [96].

given speed. In ground vehicles moving at very high speeds (more than 600 km/h) in air (Earth's atmosphere at sea level), overheating phenomena can be triggered that can lead to the destruction of the structure of the vehicle itself.

A technical alternative is to make the vehicle travel inside a tube, i.e. a closed, partially depressurised structure, while optimising the shape of the vehicle. Under these environmental conditions, subsonic and ultrasonic train speed can be theoretically achieved [87].

In purely theoretical terms, the motion resistances would tend to cancel out if a Maglev train travelled inside an evacuated tube under ambient conditions close to absolute vacuum. Of course these conditions remain ideal and therefore define the extreme physical limits of the problem.

Theoretically speaking, when the inner part of the tube is in the condition of absolute vacuum, the aerodynamic drag for the levitation train inside the tube is almost zero. Although, this is very hard to realize.

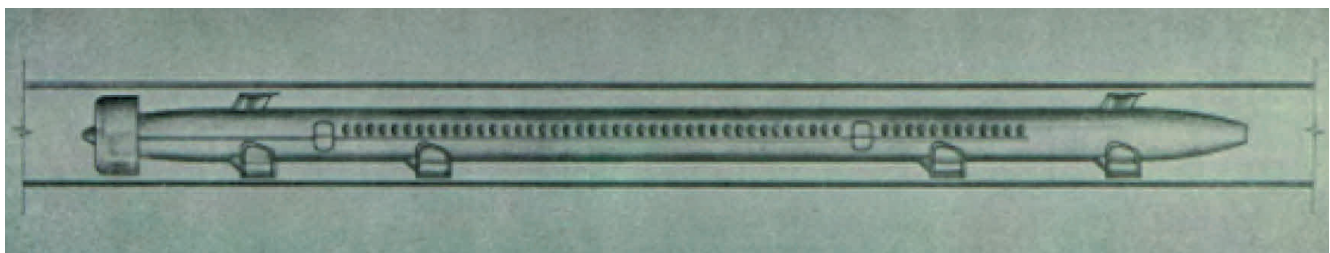
Obviously, all this is very difficult and complicated to achieve in practice since the running of an ultra-fast train inside a ducted environment causes serious aerodynamic problems (pressure waves, sound vibrations, noise, etc.) which increase rapidly with the sixth to eighth power of speed [88].

5.1. The research progress

Historically, in 1904, R. GODARD, the father of modern rocket, put forward the idea of "evacuated tube transportation" [89].

A significant contribution of knowledge to this topic was given since 1947 by Prof. FOA who led the US project called Tube-flight focused on the development of a new means of high-speed ground transportation involving a vehicle, shaped like an airplane fuselage, that is supported by air cushion devices, and propels itself with one of several possible flow induction devices through a tube [90][91]. A synthesis of these research activities and Fig. 20 are in the W.B. BROWER work [92].

However, due to technological barriers, this idea remained for several decades.



(Fonte - Source: [92])

Figura 20 – Schema del veicolo Tube-flight in scala reale con ventola canalizzata sul “naso” del veicolo.

Figure 20 – Artist's version of full-scale Tube-flight vehicle with ducted fan at vehicle nose.



(Fonte - Source: <https://www.virgin.com/branson-family/richard-branson-blog/introducing-virgin-hyperloop-one-worlds-most-revolutionary-train-service>)

Figura 21 – Virgin Hyperloop One.
Figure 21 – Virgin Hyperloop One.

In questa particolare tematica di ricerca sono attualmente coinvolti diversi paesi quali: USA, Francia, Cina, Germania, Corea del Sud; altri se ne stanno aggiungendo.

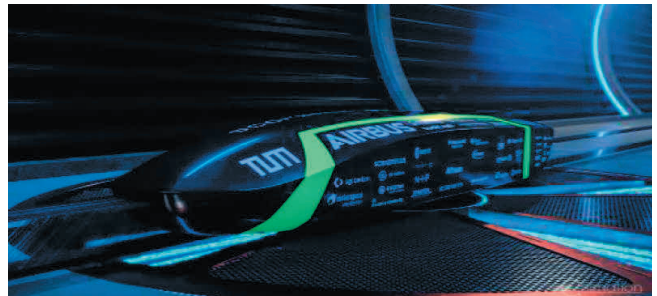
Nel 2017, il team di ricerca Virgin Hyperloop One (USA), utilizzando la tecnologia EDS con magneti permanenti, ha realizzato un sistema che ha raggiunto una velocità di 387 km/h (velocità target di 1200 km/h) su una linea lunga 500 m (Fig. 21) [97]. Nel 2020, la stessa azienda ha condotto i suoi primi test con equipaggio a bordo, raggiungendo la velocità massima di 172 km/h.

Nel 2017, l'istituto KRRI della Corea del Sud ha lanciato la ricerca denominata *super tube train* con velocità teorica di 1000 km/h. Nel 2018, l'azienda HTT (USA) ha realizzato in Spagna il suo primo veicolo passeggeri tipo *Hyperloop* a scala reale. Nel luglio 2019, il team TUM *Hyperloop* dell'Università di Monaco (Germania) ha costruito un sistema che ha raggiunto una velocità di 463 km/h su una linea di prova lunga 1,6 km realizzata in occasione di un concorso di progettazione *Super Hyperloop* promosso da SpaceX (Fig. 22).

Per quanto riguarda le attività cinesi in questo particolare settore, già alla fine del 2004, alcuni membri, tra i quali Z. SHEN, dell'Accademia Cinese delle Scienze e dell'Accademia Cinese di Ingegneria hanno organizzato un convegno sul "Trasporto intubato ad alta velocità" a Chengdu, i cui lavori hanno evidenziato la realizzabilità dei sistemi intubati ultraveloci.

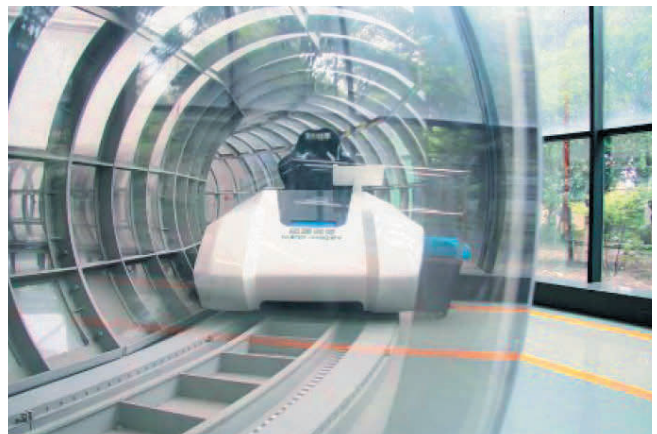
Nel 2014, la *Southwest Jiaotong University* ha costruito e messo a punto con successo il primo sistema intubato di prova al mondo, denominato "Super-Maglev", con veicolo a tecnologia HTS (Fig. 17) [98]. Tale sistema consente di integrare test di levitazione, guida, trazione, comunicazione e depressurizzazione; esso ha inoltre consentito di effettuare una serie di studi sulla dinamica e sulle prestazioni aerodinamiche del veicolo Maglev HTS (Fig. 23) [99][100]. La Tab. 3 elenca le caratteristiche principali del sistema sperimentale.

Nel 2018, il team di ricercatori della *Southwest Jiaotong University* ha iniziato a costruire una piattaforma di prova SML-ETT multifunzionale ad alta velocità (430



(Fonte - Source: <https://tumhyperloop.de/hyperloop-prototypes/#pod-4>)

Figura 22 – TUM Hyperloop.
Figure 22 – TUM Hyperloop.



(Fonte - Source: <https://tumhyperloop.de/hyperloop-prototypes/#pod-4>)

Figura 23 – Sistema prototipale SML-ETT "Super Maglev" in Cina.
Figure 23 – SML-ETT prototype "Super Maglev" in China.

With the increasing maturity of maglev technology, several studies were performed including: i) Swissmetro project with hypersonic speed [93], ii) ET3 system design patented by OSTER (1999) which involves a series of 1.5 m diameter tubes at near vacuum pressure (0.1 Pa) [94], iii) Hyperloop concept (2013) with a levitated vehicle (known as the Pod) in an enclosed tube which is depressurised to around 100 Pa [95].

The results of theoretical investigations show that current Maglev vehicle operating in an evacuated tube at 1% sea level air pressure, can reach an order of magnitude more effective than the aircraft [96].

Subsequently, the trend of research swept the world rapidly, and USA, France, China, Germany, South Korea, and other countries joined this competition.

In 2017, Virgin Hyperloop One research team of the United States adopted permanent magnet EDS to achieve a speed of 387 km/h (target speed of 1200 km/h) on its 500 m evacuated tube test line, as shown in Fig. 21 [97]. On November 9, 2020, the same company conducted its first

Tabella 3 – Table 3

Sistema prototipale SML-ETT "Super-Maglev"
The parameters of SML-ETT prototype "Super-Maglev"

Caratteristiche <i>Feature</i>	Descrizione <i>Description</i>
Tubo <i>Tube</i>	Circuito tipo racetrack <i>Racetrack-type loop</i>
Linea <i>Line</i>	Due curve con diametro di 6 m, due rettilinei di lunghezza di 3.6 m <i>Two curve of 6 m diameter, two straight line of 3.6 m</i>
Pressione <i>Pressure</i>	10 kPa – 100 kPa (0.1–1 atm)
Trazione/frenatura <i>Traction braking</i>	Motore ad induzione lineare con frenatura meccanica ibrida <i>10 kPa – 100 kPa (0.1–1 atm)</i>
Intervallo di velocità <i>Velocity range</i>	0–50 km/h

km/h) lunga 140 m e a doppio binario (Fig. 24). I valori di accelerazione e decelerazione raggiungibili sono rispettivamente di 8-15 g 15-20 g. Tale struttura serve a fornire dati scientifici necessari a realizzare una successiva piattaforma di prova a scala reale per sistemi ETT con veicoli a tecnologia HTS.

Inoltre, nel maggio 2020, è stata ufficialmente inaugurata la prima tratta multi-state *coupled rail transit dynamic test platform* presso la *Southwest Jiaotong University*. Il suo completamento è previsto per il 2023. La linea di prova per il trasporto ETT con veicoli Maglev a tecnologia HTS sarà lunga 1500 m e dotata di tutte le strutture di supporto. Si prevede che questa diventerà la più avanzata e completa piattaforma per attività di ricerca e test nel campo dei sistemi ferroviari ad altissima velocità.

5.2. Aspetti da studiare e risolvere

I sistemi Maglev EET ad altissima velocità rappresentano la nuova frontiera della ricerca che, in quanto tale, è nella fase di esplorazione e verifica ed è ancora molto lontana dall'applicazione ingegneristica.

Di seguito sono riportati alcuni aspetti scientifico-tecnologici che necessitano di essere ancora studiati e risolti:

- Trazione e frenatura: il sistema di propulsione rappresenta una delle più grandi difficoltà da affrontare. L'attuale tendenze in merito prevede l'utilizzo di un motore lineare *stepper* ad alta potenza che però implica necessariamente lo sviluppo di un azionamento lineare compatibile con le altissime velocità. L'apparato lineare richiede alta efficienza ed affidabilità, trazione stabile, ridotta forza normale etc..

manned tests with a maximum speed of 172 km/h.

In 2017, KRRI of South Korea launched the research on super tube train with a target speed of 1000 km/h. In 2018, HTT of the United States demonstrated its first Hyperloop full-size passenger compartment in Spain. In July 2019, the TUM Hyperloop team of Munich University of technology created a test speed of 463 km/h on the 1.6 km long evacuated tube test line at the Super Hyperloop design competition held by SpaceX, as shown in Fig. 22.

With regard to Chinese activities in this field, as early as the end of 2004, academicians Z. SHEN of the Chinese Academy of Sciences and the Chinese Academy of Engineering organized academicians and experts to hold a seminar on "High-Speed Evacuated Tube Transportation" in Chengdu, demonstrating the necessity and feasibility of low vacuum high-speed rail transit.

In June, 2014, Southwest Jiaotong University had successfully built and debugged the world's first evacuated tube HTS maglev vehicle test system "Super-Maglev", as shown in Fig. 17 [98] which integrates levitation, guidance, traction, communication and depressurization testing, and carried out a series of studies on the dynamics and aerodynamic performance of the evacuated tube HTS Maglev vehicle, as shown in Fig. 23 [99][100].

Tab. 3 lists the key performance parameters of the platform.

In 2018, the team of Southwest Jiaotong University began to build a 430 km/h multifunctional high-speed SML-ETT test platform, as shown in Fig. 24. The length of this line is 140 m (double lines), and the maximum experimental speed will reach 430 km/h. The acceleration of the acceleration section is 8-15 g, and the acceleration of the deceleration section is 15-20 g. This will lay the foundation for the subsequent full scale or scale test platform for evacuated tube HTS and provide scientific data.

In addition, In May 2020, the multi-state coupled rail transit dynamic test platform led by Southwest Jiaotong University was officially launched. It is planned to be completed in 2023. A 1500 m long evacuated tube maglev transportation test line and related supporting facilities will be built. This will become the most advanced comprehensive research and test platform in the field of ultra-high-speed rail transit.

5.2. Scientific-technological aspects to be studied and solved

Ultra-high-speed Maglev EET systems represent the new technological frontier, which, as such, is in the exploration

Gli aspetti tecnico-scientifici ancora da risolvere riguardano, tra l'altro, il meccanismo di disaccoppiamento, la legge di controllo della trasformazione transitoria dell'energia nonché il comportamento prestazionale (elettrico e termico) in ambiente depressurizzato.

Inoltre, occorre ulteriormente esplorare la modalità di alimentazione dello statore del motore lineare per distanze lunghe e/o ultra-lunghe.



Figura 24 – Piattaforma di prova multifunzionale per il sistema maglev SML-ETT con velocità di 430 km/h.

Figure 24 – 430 km/h multifunctional high-speed SML-ETT test platform.

- **Aerodinamica:** quando il treno viaggia ad alta velocità all'interno del tubo con vuoto parziale, lo strato "d'aria sottile" compreso fra treno e la conduttura si muove relativamente al treno e pertanto la resistenza aerodinamica continua a prevalere sulle altre. Essa dipende da diversi fattori tra i quali la velocità, il rapporto di "blocco", le condizioni di vuoto del tubo, le forma del treno, quella del tubo, etc..
Per risolvere il problema aerodinamico in corrispondenza dello strato "d'aria sottile", occorre simulare e testare i parametri fisici in condizioni di vuoto parziale ed esplorare le caratteristiche e le leggi aerodinamiche ad altissima velocità. I risultati della simulazione necessitano inoltre di essere verificati con prove sperimentali su modelli fisici.
- **Interazione tubo-treno-flusso d'aria-calore:** a causa dell'ambiente ermetico e depressurizzato del tubo, il movimento del treno genera fenomeni anormali riguardanti il flusso d'aria e di calore nella conduttura. Di conseguenza, anche la dissipazione del calore degli apparati elettrici (motori etc.) ed il mantenimento delle condizioni ambientali nella conduttura diventano complesse. Per questo motivo, occorre svolgere ulteriori attività di ricerca riguardanti: i) la legge della distribuzione e dell'evoluzione della pressione ii) il meccanismo di generazione, la legge di propagazione ed il metodo di controllo del calore, iii) il meccanismo di interazione "fluido-solido" tra il treno ad altissima velocità e l'aria nella conduttura iv) le caratteristiche aerodinamiche ed il metodo di simulazione del treno ad altissima velocità, v) la relazione tra effetto aerodinamico del treno, struttura e pressione del tubo, forma e velocità del treno, vi) l'influenza della forza aerodinamica non-stabile sulla stabilità dinamica del treno, ecc.
- **Riscaldamento aerodinamico:** quando il treno ad alta velocità viaggia all'interno di un tubo chiuso, le restrizioni dovute alle pareti del tubo stesso portano a fenomeni di pressioni e depressioni sul sistema che causano l'aumento della resistenza aerodinamica in modo significativo nonché un graduale surriscaldamento dell'ambiente. Il riscaldamento aerodinamico non si

and verification stage, and is still far from engineering application.

Therefore, safety, reliability, applicability, vacuum acquisition and maintenance, environmental control, disaster prevention, emergency rescue, economics and other aspects still need further investigation.

The following are some of the technological issues that need to be further investigated and resolved.

- **Traction and brake:** the biggest difficulty in ultra-high-speed maglev evacuated tube transportation is the traction power. It has become a consensus that the traction force adopts high-power and stepper linear motor, that is, it is necessary to develop a linear drive with a ultra-high. The devices needs to have the characteristics of linear drive, high efficiency, high reliability, stable traction, small normal force of the motor and so on.
The technical and scientific aspects still to be resolved urgently concern, among others, the decoupling mechanism, the control law of the transient energy transformation and the performance behaviour (electrical and thermal) in a depressurised environment.
In addition, the power supply mode of long-distance or even ultra-long-distance stator linear motor need to be further explored.
- **Aerodynamics:** when the train is running fast in the vacuum pipeline, the thin air in the pipeline moves relative to the train, and the aerodynamic resistance is still the main resistance of the train. There are many factors that affect the aerodynamic resistance of the train, such as speed, blocking ratio, pipeline vacuum, train shape, pipe section shape and so on.
In order to solve the problem of thin aerodynamics, it is necessary to test and determine the physical parameters of rarefied air and explore the characteristics and laws of rarefied aerodynamics under the condition of high-speed motion. The simulation results should also be verified by the physical model test.
- **Pipeline-train-airflow-thermal coupling:** due to the air-tight and low-pressure environment of the low vacuum pipeline, the abnormal complex of air flow and heat transfer in the pipeline is caused by the train move-

propaga facilmente all'esterno e quindi si accumula nell'ambiente del tubo la cui temperatura interna tende ad aumentare gradualmente.

- Prestazioni di tenuta della condotta e mantenimento del vuoto: pur adottando tecnologie di tipo aerospaziali per mantenere la tenuta del vuoto parziale nella condotta, occorre comunque garantire l'alta affidabilità del tubo preservandone anche la durata nel tempo.

Ad esempio, il dispositivo di funzionamento di chiusura ermetica (porta) di un'eventuale stazione intermedia della linea, rappresenta un problema di elevata complicazione tecnica, poiché esso implica l'uso di tecnologie del settore aerospaziale utilizzate nell'aggancio delle stazioni orbitali. Se venisse meno la tenuta del giunto di testa a causa dell'aspirazione connessa alle condizioni di vuoto, si andrebbe incontro a grandi disastri con impensabili conseguenze.

La realizzazione ed il mantenimento del vuoto parziale nelle lunghe condotte richiede l'impiego di dispositivi ad alte prestazioni con elevatissima velocità di pompaggio e lunga durata di esercizio; il tutto è ancora oggetto di ricerca. Anche la tecnologia di regolazione graduale della pressione nel tubo deve essere ulteriormente esplorata.

Inoltre ulteriori attività di ricerca e sviluppo sono ancora necessarie per risolvere gli aspetti inerenti la fornitura di energia, lo stoccaggio di energia a bordo, la comunicazione, il rumore, le stazioni, l'affidabilità, la sicurezza, il soccorso etc.

Pertanto i sistemi EET ad altissima velocità, pur presentando potenziali vantaggi per applicazioni future, sono ancora in una fase di sviluppo iniziale e quindi ulteriori attività di studio e ricerca sono necessarie per affrontare e risolvere diversi aspetti scientifico-tecnologici.

Inoltre in merito all'analisi di competitività su medio-lunghe distanze tra i sistemi di trasporto terrestre ad alta velocità ed il trasporto aereo, occorre evidenziare che essa deve essere realizzata, di volta in volta, non solo in funzione delle velocità dei rispettivi veicoli, ma anche in relazione ai tempi necessari a collegare i centri delle singole città. In questo caso, il trasporto aereo risulta penalizzato in quanto comporta tempi aggiuntivi dovuti alle fasi di imbarco/sbarco e all'ulteriore tempo di collegamento tra aeroporto e centro città. In questa analisi, se si considera che in ambito europeo le grandi città, cioè i centri di generazione ed attrazione di traffico più significativi, distano generalmente non più di 600-700 km, un sistema di trasporto terrestre con velocità media di 300-350 km/h consente di realizzare tempi di collegamento centro-centro più brevi rispetto a quelli ottenibili con il sistema aereo.

Questo concetto è anche supportato dai contenuti tecnico-scientifici del diagramma di Von Karman-Gabrielli che indicano chiaramente, in termini di efficienza com-

ment. The heat dissipation of the electrical systems (motor, etc.) and the maintenance of the pipeline environment also become complex. For this reason, it is necessary to carry out related research activities concerning: i) the law of pressure distribution and evolution in low vacuum pipeline, ii) the generation mechanism, propagation law and control method of pipeline heat, iii) the mechanism of fluid-solid coupling between ultra-high-speed train and air in low vacuum pipeline, iv) aerodynamic characteristics and representation method of ultra-high-speed train, v) relationship among train aerodynamic effect, pipe structure, train shape, train speed and pipe pressure, vi) the influence of unsteady aerodynamic force on train stability, etc.

- *Aerodynamic heating: when the high-speed train runs inside a closed tube, the restrictions due to the walls of the tube itself lead to pressures and depressions on the system that cause the increase of the aerodynamic resistance of the train significantly as well as a gradual overheating of the environment. The aerodynamic heating is not easy to spread to the outside environment and therefore it accumulates in the environment of the tube whose internal temperature tends to increase gradually.*

- *Pipeline sealing performance and vacuum efficiency: although the more mature aeronautical and air sealing technology is adopted, in order to maintain the true emptiness of the long space and time in the pipeline, the high reliability and long service life of the pipe must be ensured.*

The docking of the middle station port is a great technical difficulty issue as it involves the use of technologies used in the docking of space stations. If the sealing of the butt joint is not good, due to the suction of the super vacuum, it can lead to a major disaster, and the consequences are unthinkable.

For long pipelines, high-performance vacuum equipment with fast pumping speed and long service life is required, which is still the focus of research. In addition, the technology of gradual pressure regulation in the pipe needs to be further explored.

In addition, further research and development is still needed to solve other aspects such as energy supply, on-board energy storage, communication, noise, stations, reliability, safety, rescue and so on.

Pertanto i sistemi EET ad altissima velocità, pur presentando potenziali vantaggi per applicazioni future, sono ancora in una fase di sviluppo iniziale e quindi ulteriori attività di studio e ricerca sono necessarie per affrontare e risolvere alcuni aspetti scientifico-tecnologici.

Furthermore, with regard to the analysis of competitiveness over medium to long distances between high-speed land transport systems and air transport, it should be pointed out that this must be carried out, on a case-by-case basis, not only in relation to the speed of the respective vehicles, but also in relation to the time needed to connect the centres of the single cities; in this case, air transport is pe-

parativa, che la competizione tra i sistemi di trasporto terrestre ed aereo si manifesta per velocità operative prossime ai 400 km/h. [101].

6. Conclusioni

Nell'ambito delle applicazioni trasportistiche, la levitazione magnetica (Maglev) rappresenta una tecnologia, priva di contatto, tramite la quale il veicolo viene sostenuto, guidato e spinto tramite l'utilizzo esclusivo di forze magnetiche. Per il sofisticato contenuto tecnologico, i sistemi Maglev sono unanimemente considerati tra i più avanzati attualmente a disposizione delle industrie ferroviarie.

In questo articolo sono stati illustrati ed analizzati, dal punto di vista dell'ingegneria dei trasporti, lo stato dell'arte dei sistemi di trasporto Maglev, i principi di funzionamento, le tecnologie di base, le caratteristiche prestazionali, i limiti tecnologici ed i principali campi di applicazione.

Inoltre le fasi più significative di ricerca, sviluppate a livello internazionale negli ultimi cinque decenni, sono state illustrate ed inserite nel più ampio contesto evolutivo del sistema di trasporto ferroviario.

Sulla base dei principi fisici di funzionamento, è stata formulata una classificazione delle principali tecnologie Maglev la cui sintesi può essere così articolata:

- Sospensione con magneti permanenti (PMS).
- Sospensione elettromagnetica (EMS) ad attrazione o repulsione.
- Sospensione elettrodinamica (EDS).
- Sospensione magnetica superconduttiva (SML) sia ad alta che bassa temperatura critica di transizione.

La tecnologia PMS, pur essendo la più intuitiva, comporta complicazioni dovute all'intrinseca instabilità del sistema che ne ha, di fatto, limitato le applicazioni.

Le tecnologie EMS e EDS, le cui attività di ricerca sono iniziate negli anni '70, hanno portato alla realizzazione di sistemi di trasporto, attualmente operativi, con alto livello di affidabilità.

Pur se con limiti operativi connessi all'insorgere di resistenze magnetiche al moto, le applicazioni Maglev, operative da tempo in diversi paesi, hanno dimostrato di soddisfare le esigenze di trasporto per collegamenti sia urbani che extraurbani.

L'approccio tecnologico SML ad alta temperatura, pur essendo ancora in fase sperimentale, a seguito dei suoi indubbi vantaggi (auto-stabilità, assenza di apparati di controllo, assenza di resistenza magnetica al moto, nessun consumo elettrico per la levitazione, etc.) consente potenzialmente di superare i limiti operativi delle altre tecnologie Maglev.

nalised as it involves additional time due to the phases of embarkation/disembarkation and the additional time needed to connect the airport to the city centre.

In this analysis, if we consider that within Europe the large cities, i.e. the most significant traffic generation and attraction centers, are generally no more than 600-700 km away, a land transport system with an average speed of 300-350 km/h makes it possible to achieve shorter center-to-center connection times than those achievable with the air system.

This concept is also confirmed by technical-scientific contents of the Von Karman-Gabrielli diagram, which clearly indicate, in terms of comparative efficiency, that competition between land transport systems and air transport systems occurs at operating speeds close to 400 km/h. [101].

6. Conclusions

In transport applications, magnetic levitation (Maglev) is a non-contact technology whereby the vehicle is supported, guided and propelled using only magnetic forces. Due to its sophisticated technological content, Maglev vehicles are unanimously considered to be the most advanced systems currently available to railway industries.

In this paper, from the point of view of transport engineering, the state of the art of Maglev transport systems, the operating principles, the basic technologies, the performance characteristics, the technological limits and the main fields of application have been illustrated and analyzed.

In addition, the most significant phases of research, developed at international level over the last five decades, were illustrated and placed in the broader context of the evolution of the railway transport system.

Based on the physical principle of operation, the following categorization of the main Maglev technologies are proposed:

- *Permanent magnet suspension (PMS).*
- *Electromagnetic suspension (EMS).*
- *Electrodynamics suspension (EDS).*
- *Superconducting magnetic suspension (SML) at both high and low critical transition temperatures.*

The PMS technology, while being the most intuitive, involves complications due to system instability that have limited its applications.

Research activities on EMS and EDS technologies began in the 1970s and have resulted in currently operational Maglev transport systems with a high level of reliability.

Although with operational limitations due to the emergence of magnetic resistance to motion, Maglev applications, which have been in operation for some time in several countries, have proven to meet transport needs for both urban and extra-urban connections.

The high-temperature SML technological approach, although still in the experimental phase, due to its undoubted

Per questi motivi, istituti di ricerca appartenenti a diversi paesi quali Cina, Germania, Italia, Russia, Brasile e Giappone sono coinvolti nello sviluppo di sistemi a tecnologia SML.

Infine, sono stati descritti ed esaminati i sistemi di trasporto ultraveloci con tubo depressurizzato (EET) che utilizzano veicoli Maglev con velocità prossime a 1.000 km/h.

I sistemi Maglev EET ad altissima velocità rappresentano la nuova frontiera della ricerca che, in quanto tale, è nella fase di esplorazione e verifica ed è ancora molto lontana dall'applicazione ingegneristica e ancor di più da quella operativa in quanto ulteriori attività di studio ed approfondimento sono ancora necessarie per affrontare e risolvere diversi aspetti sia scientifici che tecnologici.

Di fatto però è iniziata una nuova sfida tecnologica eccitante ed estremamente difficile che necessita di ulteriori sviluppi e conferme.

Gli autori rimandano l'analisi dei costi e degli effetti ambientali dei sistemi di trasporto Maglev a uno studio futuro.

advantages (self-stability, absence of control apparatus, absence of magnetic resistance to motion, no electrical consumption for levitation, etc.) has the potential to overcome the operational limits of other Maglev technologies.

For these reasons, several research institutes from China, Germany, Italy, Russia, Brazil, and Japan are involved in development of SML transport system prototypes.

Finally, ultrafast transport systems with evacuated tubes (EET) using Maglev vehicles with speeds close to 1,000 km/h were described and examined.

Very high speed Maglev EET systems represent the new frontier of research which, as such, is in the exploration and verification phase and is still a long way from engineering application and even more from operational application as further study and investigation is still required to address and resolve various scientific and technological aspects.

In fact, however, a new, exciting and extremely difficult technological challenge has begun that requires further development and confirmation.

The Authors defer analysis of the costs and environmental effects of Maglev transportation systems to a future study.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] J.W. BRAY (2009), "Superconductors in Applications; Some Practical Aspects," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 19, no. 3, pp. 2533-2539, June.
- [2] E. MUSK (2013), "Hyperloop Alpha Document", published by SpaceX, August.
- [3] F.S. SMITH (1907), U.S. Patent 859,018, 2 July.
- [4] E. BACHELET (1912), U.S. Patent 1,020,942.
- [5] H. KEMPER (1937), "Schwebebahn mit räderlosen Fahrzeugen, die an eisernen Fahrschienen mittels magnetischer Felder schwebend entlang geführt werden" DE 643316.
- [6] G.R. POLGREEN (1959), "Magnetic system of transportation" U.S. Patent 3,158,765 (August 25).
- [7] J. GOU (2018), "Development Status and Global Competition Trends Analysis of Maglev Transportation Technology Based on Patent Data", Urban Rail Transit 4, 117-129.
- [8] H. FERREIRA, R. STEPHAN (2019), "Air Cushion Vehicle (ACV): History Development and Maglev Comparison, Transportation Systems and Technology" - Vol. 5. - N. 1. - P. 5-25.
- [9] J.H. BERTIN ETAL (1967), "Presssure fluid cushion guiding system for tracked ground effect machines" US Patent N. 3,332,36, June.
- [10] G. LANZARA (1973), "The IAP3 vehicle design and construction", High-speed surface transport (in Italian), Aeronautics Institute of Palermo University, vol. 2.
- [11] G. LANZARA, E. MATTIOLI (1973), "One-sided linear induction motor" (in Italian), High-speed surface transport (in Italian), Aeronautics Institute of Palermo University, vol. 2.
- [12] R. HELLINGER, P. MNICH (2009), "Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status, and Future Outlook" in Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 11, pp. 1892-1900, Nov.
- [13] M.G. POLLARD (1984), "Maglev-a British first at Birmingham" Physics in Technology 15, 2 6.
- [14] J. FISKE (2006), "The Magtube Low Cost Maglev Transportation System" The 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, 13-15 September, Dresden, Germany.
- [15] J. MEINS, L. MILLER, W.J. MAYER (1988), "The high speed Maglev transport system TRANSRAPID" in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 24, no. 2, pp. 808-811, March.

- [16] Y. YOSHIHIDE, F. MASAOKI, T. MASAO *et al.* (2004), “*The first HSST maglev commercial train in Japan*” In: *Maglev 2004 Proceedings*, vol. 1, pp. 76-85.
- [17] M. HEKLER, J. KLÜHSPIES (2018), “*Disruptive technologies transforming urban mobility? The role of the ecobee urban maglev system in the Seoul traffic vision 2030*”, *South Korea Transportation Systems and Technology*. - Vol. 4. - N. 3 suppl. 1. - pp. 115-123.
- [18] G. LIN, X. SHENG (2018), “*Application and further development of Maglev transportation in China*”, *Transportation Systems and Technology*. - Vol. 4. - N. 3. - pp. 36-43.
- [19] Q. TAN, H. QI, J. LI AND Y. TIAN (2012), “*The Reliability Modeling and Analysis on Brake System of Medium-low Speed Maglev Train*,” *2012 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, pp. 772-777, Zhangjiajie, China.
- [20] J.F. GIERAS (1994), “*Linear Induction Drives*” Oxford: Clarendon Press.
- [21] G. BOHN, G. STEINMETZ (1984), “*The electromagnetic levitation and guidance technology of the ‘transrapid’ test facility Emsland*,” in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 20, no. 5, pp. 1666-1671, September.
- [22] L.G. YAN (2002), “*Progress of high-speed Maglev in China*,” in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 12, no. 1, pp. 944-947, March.
- [23] C. WOLTERS (2008), *Latest generation maglev vehicle TR09. Maglev 2008. San Diego, USA.*
- [24] A. OHISHI (1989), “*HSST-05 system; general and operational outline at YES 89*”, *International Conference Maglev 89*.
- [25] J.L. HE, D.M. ROTE, H.T. COFFEY (1994), “*Study of Japanese electrodynamic-suspension Maglev systems*”. Technical report. 1994-04-01.
- [26] https://www.koreatimes.co.kr/www/news/nation/2016/02/116_197061.html.
- [27] L.S. TONG. (2020), “*Review of Changsha Maglev Express Train*”. *Electric locomotives and urban rail vehicles*, 43 (04): 1-5 in Chinese.
- [28] https://www.chinadaily.com.cn/interface/toutiaonew/53002523/2018-11-07/cd_37218624.html?tt_group_id=6621306267367375373.
- [29] R.F. POST, D.D. RYUTOV (2000), “*The Inductrack: a simpler approach to magnetic levitation*,” in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 10, no. 1, pp. 901-904, March.
- [30] H. NAKASHIMA, K. ISOURA (1998), “*Superconducting Maglev Development in Japan*” 15th Int. Conf. Magnetically Levitated Systems and Linear Drives Maglev '98 pp. 50-55 Mt Fuji, Yamanashi, Japan.
- [31] N. SHIRAKUNI, Y. ENDO, K. TAKAHASHI, K. YAMAMOTO (2002), “*Overview of new vehicles for the Yamanashi Maglev test line*”, *Proceedings of the 17th International Conference on Magnetically Levitated Systems (Maglev 2002)*.
- [32] <https://phys.org/news/2015-04-kmh-japan-maglev-notches-world.html#:~:text=The%20seven%2Dcar%20maglev%20train,2003%20record%20of%20581%20kph.S>.
- [33] G. LANZARA (1973), “*Magnetic levitation and propulsion with reflective foils*” In Italian, Aeronautical Institute, University of Palermo.
- [34] G. LANZARA (1990), “*Magnetically levitated vehicle with superconducting mirror sheets interacting with guideway magnetic field*” U.S. Patent 4 979 445.
- [35] WANG, J. WANG, X. WANG, Z. REN, Y. ZENG, C. DENG, H. JIANG, M. ZHU, G. LIN, Z. XU, D. ZHU, H. SONG (2003), “*The man-loading high-temperature superconducting MagLev test vehicle*,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, no. 2, part 2, pp. 2134-2137, 2003.
- [36] L. SCHULTZ, O. DE HAAS, P. VERGES, C. BEYER, S. ROHLIG, H. OLSEN, L. KUHN, D. BERGER, U. NOTEBOOM, U. FUNK (2005), “*Superconductively levitated transport system: The SupraTrans project*,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, no. 2, part 2, pp. 2301-2305, 2005.
- [37] G. LANZARA, G. D'OVIDIO, F. CRISI (2014), “*UAQ4 Levitating Train: Italian Maglev Transportation System*” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol. 9, Issue 4, pp. 71-77.
- [38] R.M. STEPHAN, R. DE ANDRE, JR., A.C. FERREIRA (2012), “*Superconducting Light Rail Vehicle*” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, pp. 122-127.
- [39] M. OKANO *et al.* (2006), “*Running Performance of a Pinning-Type Superconducting Magnetic Levitation Guide*” *J. Phys.: Conf. Ser.* 43 244.

- [40] K.L. KOVALEV, S. M.-A. KONEEV, V.N. POLTAVEC (2005), "Magnetically levitated high-speed carriages on the basis of bulk HTS elements", Pro. 8th Intern. Symp. Magn. Susp. Technol. (ISMST'8), p. 51.
- [41] G. LANZARA, G. D'OVIDIO, C. MASCIOVECCHIO, M. VILLANI (1998), "Superconducting Sheets for Train Support and Traction: Finite Element Analysis" Proceedings of 2^o International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, pp. 363-366, Tokyo, Japan, April.
- [42] G. D'OVIDIO, G. LANZARA, F. CRISI, A. NAVARRA, M. VILLANI (2003), "Light Rail Maglev with Superconductor Materials: System Design" Urban Transport IX: Urban Transport and Environment in the 21st Century, Series: Advances in Transport Vol. 14, pp. 657-665 Crete – Greece, 10-12 March.
- [43] G. D'OVIDIO, M. VILLANI, F. CRISI, A. NAVARRA, G. LANZARA (2002), "3-D finite element analysis of inductor "way" and inclined multi-sheets type secondary" COMPRAIL, Computers in Railway VIII, Series: Advances in Transport, Vol. 13, pp. 325-332, WITPRESS Lemnos, Greece June 12-14.
- [44] G. D'OVIDIO, F. CRISI, A. NAVARRA, M. VILLANI *et al.* (2002), "Attrezzatura per Prove di Levitazione e Propulsione Magnetica con Lastre in Superconduzione" Rivista di Tecnica ed Economia dei Trasporti "Ingegneria Ferroviaria" N° 11, pp. 959-970, Roma, nov.
- [45] G. D'OVIDIO, F. CRISI, A. NAVARRA, M. VILLANI (2002), "Testing of experimental equipment with circular inductor "way" and inclined multi-sheets type secondary" SAE International-IBEC/ATT, Paris, France - July 9-11.
- [46] G. D'OVIDIO, F. CRISI, A. NAVARRA, G. LANZARA (2005), "Magnetic Levitation by High Superconductor Plate Short Secondary Interacting with Translating Field: Experiences, Measurements and Modelling" Journal of Materials Processing Technology Volume 161, Issues 1-2, pp. 45-51.
- [47] G. D'OVIDIO, F. CRISI, A. NAVARRA, G. LANZARA (2004), "Maglev by passive HTC superconducting short runner above magnetic guideway" Computers in Railways IX, Series: Advances in Transport Vol. 15, pp. 963-972, WITPRESS, Southampton, UK.
- [48] G. D'OVIDIO, F. CRISI, A. NAVARRA, G. LANZARA (2006), "Comparison of maglev behavior of three inductors with static and dynamic field interacting with a HTC superconductor: test and evaluation" Physica C: Supercond., vol. 449, pp. 15-20, Nov.
- [49] G. D'OVIDIO, F. CRISI, A. NAVARRA, G. LANZARA (2006), "Comparison of lift and guidance performances of two guideways, with and without magnetic side rims, interacting with HTC superconductor" IEE Journal Transaction on Industry Application. Vol. 126, No. 10, January, Japan.
- [50] G. D'OVIDIO, F. CRISI, A. NAVARRA, G. LANZARA (2007), "Lift and guidance forces by using iron-magnetic track with side rims and passive HTC superconducting plate: experimental analyses" Materials Processing Technology, vol. 181, pp. 18-24.
- [51] G. D'OVIDIO, F. CRISI, G. LANZARA (2008), "On the magnetic resistance of YBaCuO bulk superconductor dynamically interacting with troubled flux of iron-homopolar magnetic track" Optoelectronics and Advanced Materials, vol.10, pp. 1011-1016, May.
- [52] M. VILLANI, G. D'OVIDIO, F. CRISI, A. NAVARRA (2004), "Propulsion by pm linear synchronous motor: general design guideline", Proceedings of Transport Means 2004 International Conference ISBN 9955-09-735-3 Kaunas University of Technology, Lithuania Oct.
- [53] G. D'OVIDIO, F. CRISI, A. NAVARRA (2004), "Linear synchronous motor for maglev vehicle with a.c. windings and permanent magnets: numerical analysis of experimental set up" Proceedings of Transport Means 2004 International Conference, Kaunas University of Technology, Lithuania October.
- [54] G. LANZARA, G. D'OVIDIO, F. CRISI, (2007), "Magnetically levitated system for lifting and guiding constituted by bilateral iron magnetic guide-way with permanent magnets interacting with high critical temperature superconducting "runners", with same shape of the guide-way one, set on board the vehicle (In Italian)," IT Patent 1 386 002.
- [55] G. D'OVIDIO, G. LANZARA, F. CRISI (2007), "Bipolar stepper linear motor for the propulsion of guided transportation systems, realized with d.c. supplied windings placed on board the vehicle, interacting with permanent magnets distributed on the bilateral iron magnetic guide-way of the track", (in Italian), IT Patent n. 1385998.
- [56] G. D'OVIDIO, F. CRISI, G. LANZARA (2008), "A "V" shaped superconducting levitation module for lift and guidance of a magnetic transportation system" Physica C: Supercond., vol. 468, pp. 1036-1040, July.
- [57] G. D'OVIDIO, F. CRISI, G. LANZARA (2011), Material Science Forum in Applied Electromagnetic Engineering, vol. 1058, pp. 42-47.
- [58] G. D'OVIDIO, F. CRISI (2014), "Suspension Dynamic Behavior of HTS Magnetically Levitated Bogie" Materials Science Forum Vol. 792 pp. 198-203, Trans Tech Publications, Switzerland.

- [59] G. D'OVIDIO, A. CARPENITO (2015), "Dynamic Analysis of High Temperature Superconducting Vehicle Suspension" Journal of Superconductivity and novel Magnetism, Vol. 28, N. 2).
- [60] R. ALAGGIO, F. BENEDETTINI, F. D'INNOCENZO, G. D'OVIDIO, D. SEBASTIANI, D. ZULLI (2015), "Modal Identification of Superconducting Magnetic Levitating Bogie" Dynamics of Civil Structures, Vol. 2 Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series 2015, pp. 227-236.
- [61] R. ALAGGIO, A. CARPENITO, G. D'OVIDIO, D. SEBASTIANI (2018), "Transition Curve Effect on Lateral Vibration of Superconducting Experimental Maglev Bogie; Nonlinear Dynamic Approach" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 28 (8), 1-9.
- [62] A. ALOISIO, M. DE ANGELO, R. ALAGGIO, G. D'OVIDIO (2020), "Dynamic Identification of HTS Maglev Module for Suspended Vehicle by Using a Single-Degree-of-Freedom Generalized Bouc–Wen Hysteresis Model" Journal of Superconductivity and Novel Magnetism.
- [63] G. D'OVIDIO, F. CRISI (2012), "High speed propulsion system for UAQ4 magnetic levitating train" Mater. Sci. Forum Appl. Electromagn. Eng., vol. 721, pp. 9-14, June.
- [64] J. WANG, S. WANG, Y. ZENG, H. HUANG, AND X. DONG (2002), "The first man-loading high temperature superconducting maglev test vehicle in the world," Physica C, vol. 378-381, pp. 809-814.
- [65] Z. DENG, W. ZHANG, J. ZHENG, Y. REN, D. JIANG, X. ZHENG, J. ZHANG, P. GAO, Q. LIN, B. SONG, C. DENG (2016), "A High-Temperature Superconducting Maglev Ring Test Line Developed in Chengdu, China", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, no. 6, Sep., Art. no. 3602408.
- [66] J. ZHENG, H. HUANG, S. ZHANG, Z. DENG (2018), "A General Method to Simulate the Electromagnetic Characteristics of HTS Maglev Systems by Finite Element Software", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 28(5), pp. 3600808, Aug.
- [67] H. HUANG, J. ZHENG, H. LIAO, Y. HONG, H. LI, Z. DENG (2019), "Effect Laws of Different Factors on Levitation Characteristics of High-Tc Superconducting Maglev System with Numerical Solutions", Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, vol. 32(8), pp. 2351-2358, Aug.
- [68] Z. DENG, J. ZHANG, W. WANG, Y. YUAN, W. LEI, J. ZHAO, Z. LIU, M. WEI, P. ZHANG, P. WANG, X. ZHANG, J. ZHENG (2020), "The New High-Temperature Superconducting Maglev Vehicle Developed in ASCLab," 2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), Tianjin, pp. 1-2, doi: 10.1109/ASEMD49065.2020.9276330.
- [69] J. LI, J. ZHENG, H. HUANG, Y. LI, H. LI, Z. DENG (2017), "Motion stability of the magnetic levitation and suspension with YBa₂Cu₃O_{7-x} High-Tc superconducting bulks and NdFeB magnets" Journal of Applied Physics 122 15 153902.
- [70] J. LI, H. LI, J. ZHENG, B. ZHENG, H. HUANG, Z. DENG (2017), "Nonlinear Vibration Behaviors of High-Tc Superconducting Bulks in an Applied Permanent Magnetic Array Field," Journal of Applied Physics, vol. 121(24), pp. 243901, Jun.
- [71] J. LI, Z. DENG, C. XIA, Y. GOU, C. WANG, J. ZHENG (2019), "Subharmonic Resonance in Magnetic Levitation of the High-Temperature Superconducting Bulks YBa₂Cu₃O_{7-x} Under Harmonic Excitation", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 29(4), pp. 3600908, Jun.
- [72] H. LI, D. LIU, Y. HONG, J. YU, J. ZHENG, Z. DENG (2020), "Modeling and Identification of the Hysteresis Nonlinear Levitation Force in HTS Maglev Systems" Superconductor Science and Technology, vol. 33(5), pp. 054001, May.
- [73] Z. DENG, J. LI, H. WANG, Y. LI, J. ZHENG (2019), "Dynamic Simulation of the Vehicle / Bridge Coupled System in High Temperature Superconducting Maglev", Computing in Science & Engineering, vol. 21(3), pp. 60-71, May.
- [74] H. WANG, Z. DENG, S. MA, R. SUN, H. LI, J. LI (2019), "Dynamic Simulation of the HTS Maglev Vehicle-Bridge Coupled System Based on Levitation Force Experiment", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 29(5), pp. 3601606, Aug.
- [75] Z. DENG, W. ZHANG, Y. CHEN, X. YANG, C. XIA, J. ZHENG (2020), "Optimization Study of the Halbach Permanent Magnetic Guideway for High Temperature Superconducting Magnetic Levitation," Superconductor Science and Technology, vol. 33(3), pp. 034009, Mar.
- [76] Y.J. LI, Q. DAI, Y. ZHANG, H. WANG, Z. CHEN, R.X. SUN, J. ZHENG, C.Y. DENG, Z.G. DENG (2016), "Design and Analysis of an Electromagnetic Turnout for the Superconducting Maglev System", Physica C, vol. 528, pp. 84-89, Sep.
- [77] J. ZHENG, R. SUN, H. LI, X. ZHENG, Z. DENG (2020), "A Manned Hybrid Maglev Vehicle Applying Permanent Magnetic Levitation (PML) and Superconducting Magnetic Levitation (SML)", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 30(1), pp. 3600107, Jan.

- [78] H.T. LI, Z.G. DENG, J.P. LI, Y.X. LI, J. ZHENG (2018), *Lateral motion stability of high-temperature superconducting maglev systems derived from a nonlinear guidance force hysteretic model* Superconductor Science and Technology 31 7 75010.
- [79] H. YAGHOUBI, N. BARAZI *et al.* (2010), *“Technical Comparison of Maglev and Rail Rapid Transit Systems”* Proc. the 21st International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, October 10-13, 2011, Daejeon, Korea.
- [80] H. LEE, K. KIM, J. LEE (2006), *“Review of maglev train technologies”* in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, no. 7, pp. 1917-1925, July.
- [81] S. YAMAMURA (1976), *“Magnetic levitation technology of tracked vehicles present status and prospects”*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-12, No. 6, Nov.
- [82] W.M. SASLOW (1992), *“Maxwell’s theory of eddy currents in thin conducting sheets, and applications to electromagnetic shielding and MAGLEV”*, American Journal of Physics 60, 693.
- [83] A. STEPHAN, A. LASCHER (2008), *“Comparison of Train of TRANSRAPID and MLX01”* in Proc. 18th Int. Conf. Magnetically Levitated System Linear Drives, Shanghai, CD ROM.
- [84] E. FRITZ *et al.* (2018), *“Energy Consumption of Track-Based High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail”* Research Series Volume 3, Publisher: The International Maglev Board | International Association for Maglev Transport.
- [85] J.A. SCHETZ (2001), *“Aerodynamics of high-speed trains”*. Annual Review of fluid mechanics 33(1):371-414.
- [86] A. BARON, M. MOSSI, S. SIBILLA (2001), *“The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels”* Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics” Vol. 89, Issue 5, pp. 365-401.
- [87] J.Q. MA, D.J. ZHOU, LIFENG ZHAO, YONG ZHANG, YONG ZHAO (2013), *“The approach to calculate the aerodynamic drag of maglev train in the evacuated tube”* Journal. Mod. Transport. 21(3):200-208.
- [88] C. TALOTTE (2000), *“Aerodynamic noise: a critical survey”*. Journal of Sound and Vibration 231(3):549-562.
- [89] H.R. GODDARD (1945), Apparatus for vacuum tube transportation. US Patent 2488287 Oct.
- [90] J.V. FOA (1966), *“High-Speed Transport in Non-Evacuated Tube”* Proceedings of the Joint ASME/IEEE-ASCE National Transportation Symposium, San Francisco, Calif., May.
- [91] J.V. FOA (1968), *“A Note on Guideway Optimization for Tube Transport Systems”* High-Speed Ground Transportation Journal, Vol. II, No. 2, May.
- [92] W.B. BROWER (1970), *“Tubeflight -A Review”* The Space Congress® Proceedings. 2. <https://commons.erau.edu/space-congress-proceedings/proceedings-1970-7th/session-10/2>.
- [93] M. MOSSI AND S. SIBILLA (2002), *“Swissmetro: Aerodynamic drag and wave effects in tunnels under partial vacuum”* Proceedings of the 17th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Lausanne, Switzerland, pp. 156-163.
- [94] D. OSTER, M. KUMADA, Y. ZHANG (2011), *“Evacuated tube transport technologies (ET3) tm, a maximum value global transportation network for passengers and cargo”* Journal of Modern Transportation 201119(1) 42-50.
- [95] M. ELON (2013), Hyperloop alpha [EB/OL], Space X. America, [2021-1-03]. http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha.pdf.
- [96] <http://gcep.stanford.edu>, GCEP Energy Assessment Analysis “An Assessment of Advanced Transportation Research Opportunities” Stanford University, Spring, 2006.
- [97] <https://virginhyperloop.com/>.
- [98] Z. DENG, W. ZHANG, J. ZHENG, B. WANG, Y. REN, X. ZHENG, J. ZHANG (2017), *“A High-Temperature Superconducting Maglev-Evacuated Tube Transport (HTS Maglev-ETT) Test System”*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 27, no. 6, Sep., Art. no. 3602008.
- [99] P. WANG, B. WANG, J. WANG, X. HU, J. ZHENG AND Z. DENG (2020), *“Influence of Tube Structure on the Aerodynamic Characteristics of HTS Maglev Vehicles”*, 2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), pp. 1-2, Tianjin.
- [100] T. MA, B. WANG, X. HU, J. WANG, Y. RAO, J. ZHENG, Z. DENG (2020), *“Aerodynamic Drag Characteristics of the HTS Maglev Vehicle Running in a Low Air-Pressure Tube”*, IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), pp. 1-2, Tianjin.
- [101] G. GABRIELLI, T.H. VON KARMAN (1958), *“What price speed? Specific power required from propulsion of vehicle”*, Mechanical Engineering, pp. 775-782.